

Grunnleggende brannteknikk



Bjarne Christian Hagen

2. utgave

Grunnleggende brannteknikk

Bjarne Christian Hagen

Copyright ©Bjarne Christian Hagen, 2018

Forside: Bjarne CHR. Hagen

Forsidefoto: Per Fredrik Lennart Hemmingsson

ISBN: 978-82-996645-2-3

Det må ikke kopieres fra denne boken i strid med åndsverkloven, fotografiloven eller i strid med avtaler om kopiering inngått med KOPINOR, interesseorgan for rettighets-
havere til åndsverk.

Til min hustru Anne Mari
og barna våre:
Tor Gunnar, Ole Christian, Henning og Sofie

Forord

Boken Grunnleggende brannteknikk er utviklet for å gi en introduksjon i brannikkerhet spesielt rettet mot tekniske innretninger, varme og energi-transport samt mer spesifikke problemstillinger innen brannvern som røykproduksjon og brannspredning. Det er 14 år siden første utgave av denne boken kom ut. Det har skjedd mye innen brann i Norge siden da. Dette er gjenspeilet i kapitlet om brann og samfunn. Samtidig ser vi at det ikke skjer like mye innen forskning og utvikling på dette området. Mye av teorien er derfor den samme.

Hensikt

Hensikten med boken er å gi en introduksjon til brann og brannvern. Boken er forsøkt skrevet på en lettfattelig måte slik at lesere med forskjellig bakgrunn vil ha utbytte av å lese boken. Lesere med videregående skole (eller gymnas) vil kjenne igjen en rekke av de mer grunnleggende utledningene, men disse er tatt med for å sikre at alle leserne har mulighet til å følge de påfølgende utledningene av teori og ligninger.

Språk

Et viktig moment ved utformingen av boken har vært å bruke norske ord og uttrykk. Innen brannvern er det lite norsk litteratur, og dette har ført til en omfattende bruk av engelske ord og uttrykk. Det norske språk er mer forklarende i sin uttrykksform enn engelsk. For å forklare engelske ord er det derfor ofte nødvendig å bruke flere norske ord. Det har dessverre utbredt seg en kultur for å ta engelske ord og formorske disse uten å undersøke om det er gode norske ord en kan bruke istedenfor. I denne boken er det forsøkt å bruke norske ord og uttrykk i størst mulig grad. Dessverre har det ikke lyktes hele tiden. Leseren anbefales å se på hjemmesiden til Kollegiet for brannfaglig terminologi (www.kbt.no) for mer utfyllende definisjoner og beskrivelser av norske branntekniske uttrykk.

Takk til

Jeg vil få lov til å takke min hustru Anne Mari og mine foreldre Anne-Berit og Gunnar Hagen for deres hjelp og gode kommentarer ved utformingen av boken, samt støtte og

oppmuntring når det ikke har vært så lett å skrive. Jeg vil også takke studentene på Høgskulen på Vestlandet (HVL) for deres tilbakemeldinger både vedr. fagene Grunnleggende brannteknikk og Brannodynamikk hvor boken og de forskjellige utkastene til den har vært brukt i forelesningene. Tilslutt vil jeg takke mine kollegaer på HVL og i KBT for mange gode, morsomme og tankevekkende brannfaglige diskusjoner.

Bjarne CHR. Hagen

Haugesund - 2018

Notasjon

Symbol	Beskrivelse	Enhet
a	Lengde	m
A	Areal	m ²
b	Bredde	m
Bi	Biot-tallet	
c	Høyde	m
C_i	Konsentrasjon	%
c_p	Spesifikk varmekapasitet ved konstant trykk	J/(°C mol)
c_v	Spesifikk varmekapasitet ved konstant volum	J/(°C mol)
D_f	Brannens diameter	m
F	Synsfaktor	
g	Tyngdekraftens akselerasjon, oppgis vanligvis til 9,81	m/s ²
h	Konveksjonsfaktor	W/(m ² °C)
H	Høyde	m
ΔH_f	Formasjonsvarme	kJ/mol
ΔH_C	Forbrenningsvarme	kJ/mol
I	Intensitet	W/m ²
k	Varmedledningsevne	W/(m °C)
K	Utstrålingstall, 1,1 m ⁻¹	
KE	Kinetisk energi	J
l	Lengde	m
L	Karakteristisk lengde	m
L_v	Fordampningsvarme	J/kg
m	Masse	kg
\dot{m}	Masse pr. tidsenhet	kg/s
\dot{m}''	Massetapsrate	g/(m ² s)
n	Antall mol	
Nu	Nussel tall	
NBG	Nedre brennbarhetsgrense	%
p	Trykk	Pa eller atm
p°	Damptrykk	mmHg
PE	Potensiell energi	J
Pr	Prandtl tall	
q	Energi som tilføres et system	J
\dot{q}	Varmestrøm	J/s eller W
\dot{q}_c	Konvektiv varmestrøm	J/s eller W
\dot{q}''	Varmefluks	W/m ²
\dot{q}''_b	Varmestråling fra flammer	kW/m ²
\dot{q}''_e	Varmestråling fra eksternkilde	kW/m ²
\dot{q}''_t	Varmesledning gjennom materiale	kW/m ²

Symbol	Beskrivelse	Enhet
\dot{q}_{ts}''	Tilbakestråling fra brenselet	kW/m ²
\dot{q}_{λ}''	Monokromatisk strålefluks	W/(m ² μm)
\dot{q}'''	Varmemengde pr. volum	W/m ³
Q	Total energi eller varmemengde	J
ΔQ	Tilført energi	J
\dot{Q}	Varmeproduksjon	J/s eller W
r	Radius	m
R	Termisk motstand	°C/W
R	Gasskonstant	
Ra	Rayleigh-tall	
Re_f	Reynolds tall	
T	Temperatur	°C eller K
dT	Temperaturforskjell	°C eller K
t	Tykkelse	m
t	Tid	s
U	Indre energi	J
ΔU	Endring i indre energi	J
v	Hastighet	m/s
V	Volum	m ³
\dot{V}	Volumstrøm	m ³ /s
W	Arbeid som utføres av et system	
Δx	Tykkelse	m
X	Dybde i brannrom	m
z	Høyde	m
z_k	Begrensende flammehøyde	m
z_0	Høyde fra brensel til virtuelt origo	m
z_*	Høyde fra punktkilde til røyklag	m
ØBG	Øvre brennbarhetsgrense	%

Greske bokstaver

α	Absorbent energi	
α	Termisk diffusivitet	m ² /s
β	Ekspansjonstall	°C ⁻¹
γ	Produksjonsfaktor	g/g
ϵ	Emissivitet	
λ	Bølgelengde	μm
ϕ	Vinkel	
ρ	Reflektert energi	
ρ	Tetthet	kg/m ³
σ	Stefan-Boltzmanns konstant, $5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$	
τ	Energitransport igjennom et materiale	
τ	Tid	s
θ	Vinkel	

Symbol	Beskrivelse	Enhet
μ	Dynamisk viskositet	kg/(m s)
ν_f	Kinematisk viskositet	m ² /s
ζ	Molfraksjon	
χ	Forbrenningseffektivitet	
$d\omega$	Romvinkel	

Subscript

∞	Henviser til egenskaper for omkringliggende væske eller gass
F	Før et system er påvirket
E	Etter et system er påvirket
G	Grense
i	Henviser til et generelt element
w	Henviser til vegg eller flate
Tall	Henviser til et spesifikt element

Annet

[]	Henviser til bibliografien på side 293
()	Se nummererte ligninger
Tall	Se fotnote nederst på samme side

Innhold

I	Brann og samfunn	1
1	Brann og samfunn	3
1.1	Introduksjon	3
1.2	Tap av menneskeliv	3
1.2.1	Antall omkomne	3
1.2.2	Kjønnforskjeller	4
1.2.3	Barn og brann	4
1.2.4	Aldersfordeling	8
1.2.5	Universell utforming	8
1.3	Tap av økonomiske verdier	8
1.3.1	Verditap	8
1.3.2	Sammenligning med andre land	9
1.3.3	Bakgrunn for verditapene	11
II	Brannutvikling	13
2	Brannforløp i rom og bygninger	15
2.1	Brann i rom	15
2.2	Fasene i en brann	19
2.2.1	Antennelsesfasen	19
2.2.2	Vekstfasen	20
2.2.3	Fullt utviklet brann	21
2.2.4	Utbrenningsfasen	22
2.3	Fenomen i brann	23
2.3.1	Overtenning	23
2.3.2	Backdraft	24
2.3.3	Pulsering	26
2.4	Brannspredning til andre rom og etasjer	26
2.5	Brannspredning til andre bygninger	28
2.5.1	Varmestråling	28
2.5.2	Flyvebranner	29

III	Varmelære	31
3	Varmelære	33
3.1	Introduksjon	33
3.2	Energi og varme	33
3.2.1	Kinetisk energi	34
3.2.2	Potensiell energi	34
3.2.3	Indre energi	34
3.3	Termodynamikk	35
3.3.1	Termodynamikkens første lov	36
3.3.2	Termodynamikkens andre lov	37
3.4	Varmetransport	39
4	Brann- og varmetransport	43
4.1	Mekanismer for brannspredning	43
4.1.1	Brannspredning p.g.a. varmeledning	43
4.1.2	Brannspredning p.g.a. konveksjon	44
4.1.3	Brannspredning p.g.a. varmestråling	44
4.1.4	Brannspredning p.g.a. flyvebrann	46
5	Varmeledning	47
5.1	Generell ligning	47
5.1.1	Fouriers lov om varmeledning	47
5.1.2	Flerdimensjonal varmeledning	49
5.2	Stasjonær varmeledning	52
5.3	Temperaturavhengig varmeledningsevne	54
5.4	Komplekse konstruksjoner	55
5.4.1	Material i serie	55
5.4.2	Parallele materialer	58
5.4.3	Sammensatte konstruksjoner	63
6	Konveksjon	71
6.1	Newtons lov for kjøling	71
6.2	Turbulent eller laminær strømning	74
6.3	Tvungen konveksjon	76
6.4	Naturlig konveksjon	79
7	Varmestråling	85
7.1	Beskrivelse av varmestråling	85
7.2	Materialer	87
7.2.1	Egenskaper	87
7.2.2	Svarte legemer	88
7.2.3	Grå legemer	89
7.3	Varmestråling mellom objekter	91
7.3.1	Intensitet	91

7.3.2	Varmestråling mellom svarte legemer	95
7.4	Geometrisk synsfaktor	98
7.4.1	Synsfaktordiagram	98
7.4.2	Beregning av synsfaktorer	103
7.5	Varmestråling mellom grå legemer	105
7.6	Praktiske eksempler	107
7.6.1	Stråling fra en flamme	107
7.6.2	Stråling fra en husbrann	108
8	Kombinasjoner av varmetransport	113
8.1	Varmeledning og konveksjon	113
8.2	Varmeledning, konveksjon og stråling	117
9	Transient varmeledning	121
9.1	Oppvarming av et objekt	121
9.2	Termisk tynne objekter	122
9.3	Transient varmeledning for semi-uendelig objekt	126
IV	Energi- og røykproduksjon	131
10	Generell kjemi	133
10.1	Kjemiske reaksjonsligninger	133
10.2	Gasslover	137
10.2.1	Den ideelle gassloven	137
10.2.2	Avogadros lov	139
10.2.3	Daltons lov	141
10.3	Gasstetthet	143
10.4	Damptrykk	146
11	Brannkjemi	151
11.1	Brannfirkanten	151
11.1.1	Brensel	151
11.1.2	Oksygen og energi	153
11.1.3	Kjedereaksjon	154
11.2	Forbrenning av gasser	155
11.2.1	Fullstendig forbrenning	155
11.2.2	Brenselsfattig	156
11.2.3	Brenselsrik	156
11.3	Energiproduksjon	158
11.3.1	Forbrenningsvarme ΔH_C	158
11.3.2	Formasjonsvarme ΔH_f	158
11.3.3	Forbrenningsvarme ΔH_C fra kalorimetri	163
11.3.4	Massetapsrate	164
11.3.5	Beregning av varmeproduksjon	167

11.4	Brennbarhetsgrense	168
11.4.1	Brennbarhetsgrenser under normale forhold	169
11.4.2	Brennbarhetsgrenser ved elevert temperatur og trykk	171
11.4.3	Brennbarhetsdiagram	174
12	Flammer og flammetemperatur	177
12.1	Forblandet flamme	177
12.1.1	Oppbygging av en forblandet flamme	177
12.1.2	Kjennetegn på forblandet flamme	179
12.2	Diffusjonsflamme	179
12.2.1	Oppbygging av en diffusjonsflamme	179
12.2.2	Kjennetegn på diffusjonsflamme	181
12.3	Adiabatisk flammetemperatur	183
12.3.1	Teoretisk utledning	183
12.3.2	Beregningseksempler	185
13	Antennelse	189
13.1	Termisk eksplosjon	189
13.2	Antennelse med tennkilde	195
13.2.1	Antennelse av gass	195
13.2.2	Antennelse av væske	196
13.2.3	Antennelse av fast stoff	197
13.3	Antennelse uten tennkilde	198
13.3.1	Selvantennelse	198
13.3.2	Spontanantennelse	199
14	Røykproduksjon	203
14.1	Definisjon av røyk	203
14.2	Røykskader	204
14.2.1	Røykskade på person	204
14.2.2	Røykskade på objektet	206
14.3	Forbrenningsprodukt fra brann	206
14.4	Røykproduksjon	210
14.4.1	Røyksoyleteori	210
14.4.2	Ligning for røykproduksjon	211
14.4.3	Røykproduksjon over flammehøyden	212
14.4.4	Røykproduksjon under flammehøyden	214
14.5	Gjennomgående eksempler av røykproduksjon	215
14.5.1	Eksempel med varmereproduksjon på 1500 kW	215
14.5.2	Eksempel med varmereproduksjon på 250 kW	217

V	Brannvern	219
15	Brannteknisk perspektiv	221
15.1	Introduksjon	221
15.2	Forebyggende brannvern og organisatoriske tiltak	222
15.2.1	Offentlig brannvern	222
15.2.2	Privat brannvern	223
15.3	Teknisk brannvern	224
15.4	Oppsummering	224
16	Branndeteksjon	227
16.1	Automatisk brannalarmanlegg (ABA)	227
16.2	Varmedetektor	229
16.3	Røykdetektor	231
16.3.1	Ionisk røykdetektor	232
16.3.2	Optisk røykdetektor	232
16.3.3	Praktiske forhold ved røykdeteksjon	234
16.4	Flammedetektor	234
16.4.1	Infrarød flammedetektor	234
16.4.2	Ultrafiolett flammedetektor	235
17	Brannslukking	237
17.1	Slukketeori	237
17.2	Valg av slukkemiddel	238
17.2.1	Vurdere brensel- og branntype	238
17.2.2	Sekundærskader	239
17.2.3	Vurdere person- og miljø sikkerhet	239
17.2.4	Tilgjengelighet av slukkemiddel	240
17.3	Vann	240
17.3.1	Sprinklersystem	240
17.3.2	Vanntåkesystem	242
17.4	Skum	242
17.5	Gass	243
17.5.1	Inerte gasser	243
17.5.2	Inhibitor-gasser	244
17.6	Pulver	244
18	Røykkontroll	247
18.1	Røykspredning	247
18.2	Drivkrefter	248
18.2.1	Skorsteinseffekt	248
18.2.2	Termisk oppdrift av varm røyk	249
18.2.3	Termisk ekspansjon av varm røyk	249
18.2.4	Vindkrefter	249
18.3	Ventilasjonsåpninger	249

18.4	Prinsipp for røykkontroll	252
18.4.1	Aktiv røykkontroll	252
18.4.2	Passiv røykkontroll	255
19	Passivt brannvern	259
19.1	Begrep	260
19.1.1	Brannmotstand	260
19.1.2	Gamle betegnelser	260
19.2	Faktorer som påvirker brannmotstanden	261
19.2.1	Beskyttelsesmekanismer	261
19.2.2	Harmathys regler	262
19.3	Beskyttelse av bygningsdeler	268
19.3.1	Metoder	268
19.3.2	Tre	268
19.3.3	Stål	269
19.3.4	Betong	269
19.4	Seksjonering	270
19.5	Hindre brannsmitte mellom bygg	271
19.6	Standardbrann	272
VI	Tillegg	275
A	Tabeller	277
A.1	SI-systemet	278
A.2	SI-prefikser	279
A.3	Greske bokstaver	279
A.4	Omregningsfaktorer	280
B	Varmeledning i semi-uendelige materialer	281
B.1	Utledning	281
B.2	Error-funksjonen	284
C	Materialverdier	285
D	Kort om romvinkel	289
	Bibliografi	293
	Register	300

Del I

Brann og samfunn

Kapittel 1

Brann og samfunn

1.1 Introduksjon

Brann i Norge medfører tap av både menneskeliv og økonomiske verdier. Videre utgjør brann en fare for kulturminner som f.eks. stavkirker og museum, samt andre viktige samfunnsstrukturer som trafikknutepunkt, tunneller, jernbane og telekommunikasjon. De siste 5 årene (2013-2017) har det i gjennomsnitt omkommet 43 mennesker hvert år, samtidig som de årlige verditapene har vært mellom 4 og 5 milliarder kroner. Disse tallene blir ansett som høye, og det er et kontinuerlig arbeid for å redusere tapstallene. Nasjonalt har Stortinget vedtatt en stortingsmelding¹ hvor en rekke mål og tiltak er presentert. De viktigste målsetningene innen brannvern er [55]:

- Færre omkomne i brann
- Unngå tap av uerstattelige kulturhistoriske verdier
- Unngå branner som lammer kritiske samfunnsfunksjoner
- Styrket beredskap og håndteringsevne
- Mindre tap av materielle verdier

I dette kapitlet vil brannstatistikken for antall døde i brann bli diskutert, sammen med tap av økonomiske verdier. Dette vil bedre forståelsen for hvorfor brannvern er viktig for samfunnet.

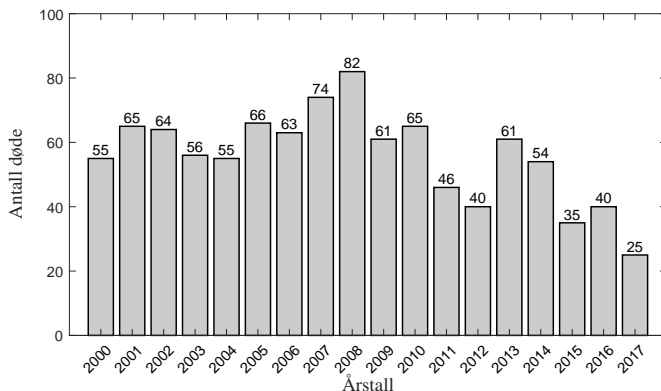
1.2 Tap av menneskeliv

1.2.1 Antall omkomne

Fra 2000 til 2017 har tallet på omkomne som følge av brann variert mellom 25 og 82 personer, se figur 1.1 [19]. Tallene fra Direktoratet for samfunnsikkerhet og beredskap

¹Stortingsmelding nr. 35 (2008-2009) Brannsikkerhet - Forebygging og brannvesenets redningsopp-gaver

(DSB) viser at det var færre brannøde i 2015, 2016 og 2017 enn gjennomsnittet for de foregående årene. Dette er positivt, men det er for tidlig å si om dette er en vedvarende trend i antall omkomne. Dersom Norge sammenlignes med andre land, befinner Norge seg i midtsjiktet på dødsstatistikken, når antall døde pr. hundretusen innbyggere sammenlignes. Se figur 1.2.



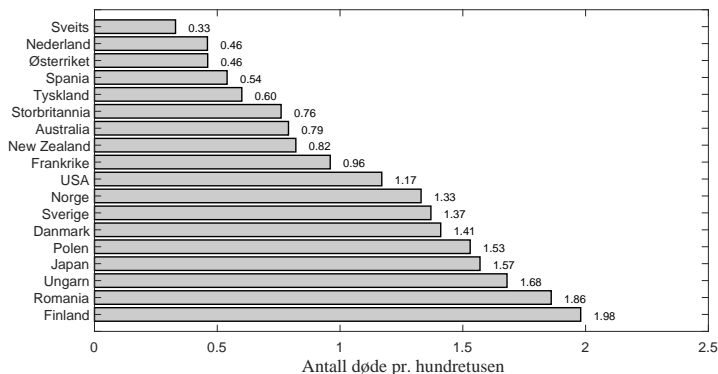
Figur 1.1: Antall døde 2000 - 2017 [19].

1.2.2 Kjønnforskjeller

En nærmere undersøkelse av dødsstatistikken, gir en bedre forståelse for hvem som dør som følge av brann. En generell trend som kommer meget tydelig frem i statistikken, er at menn dør hyppigere i brann enn kvinner. Figur 1.3 og 1.4 viser tydelig forskjellen mellom kjønnene. Det er ikke en entydig forklaring på hvorfor menn dør hyppigere enn kvinner, men det er dokumentert forskjellige handlingsmønstre mellom kjønnene i forbindelse med branntilløp [12]. I tabell 1.1 er de fem første handlingene til henholdsvis kvinner og menn satt opp. Tabellen viser at menn vil undersøke hvor det brenner, for så å prøve og slukke brannen [12]. Kvinner derimot vil i større grad fokusere på rømning og forflytter seg til tryggere områder. Ved å evakuere istedenfor å bekjempe brannen, reduserer kvinnene sin sannsynlighet for å omkomme i brann [12]. Det er også observert at flere menn enn kvinner går inn i brennende bygninger, selv om de i utgangspunktet har foretatt en sikker rømning [12].

1.2.3 Barn og brann

Dødsstatistikken for 2010, 2011 og 2012 (se statistikken i figur 1.3 og 1.4) viser at trenden som fremkommer for voksne også gjelder for barn. Gutter dør hyppigere i brann enn jenter. Lek med åpen ild er en av de hyppigste årsakene til at barn omkommer i brann



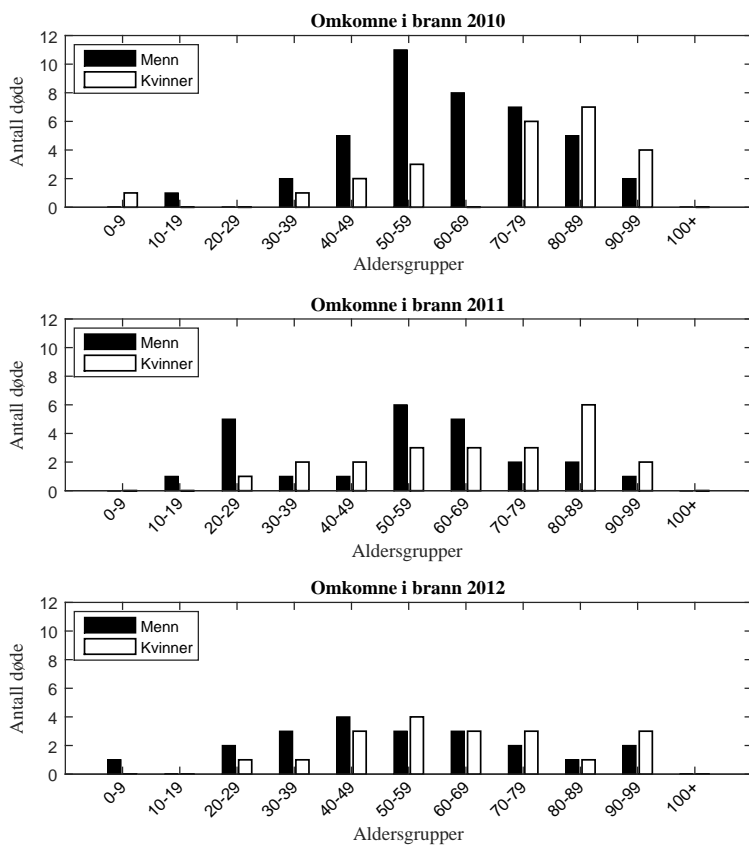
Figur 1.2: Antall døde pr. hundretusen innbyggere (Gjennomsnitt fra 2007-2009) [19].

Tabell 1.1: Handlingsmønster til menn og kvinner i USA ved en brannalarm [12]. Prosentandelen viser hvor stor del av gruppene deltok i de forskjellige handlingene.

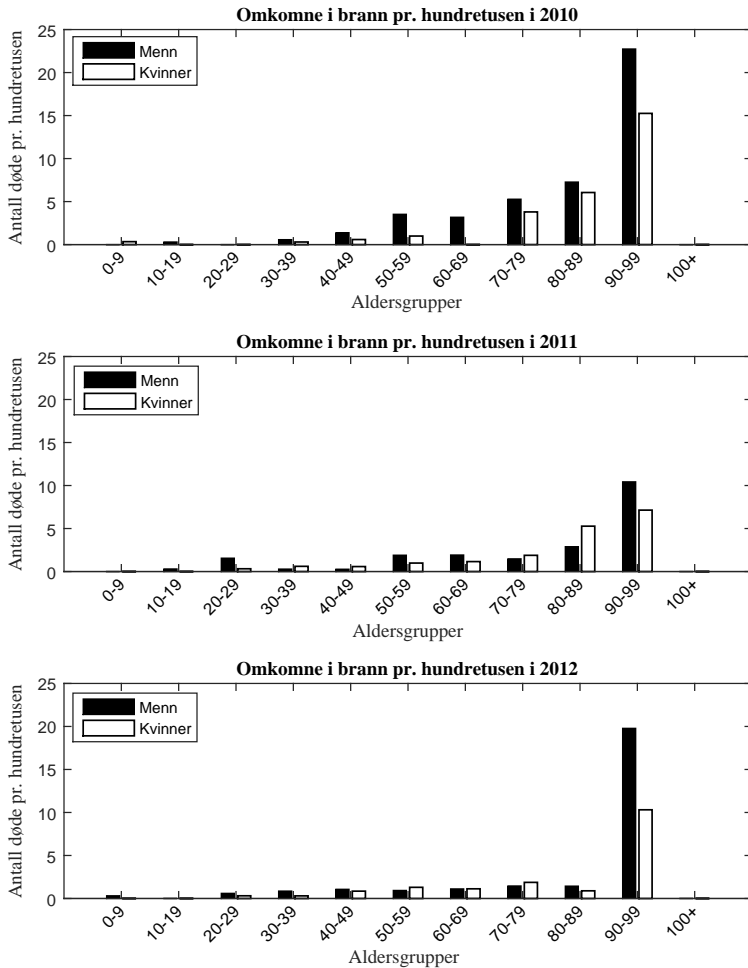
Handling	Kvinner		Menn	
		(%)		(%)
Første	Varsle andre	13.8	Varsle andre	16.3
Andre	Ringe brannvesenet	11.4	Lete etter brannen	14.9
Tredje	Finne familien	11.0	Finne slukkeutstyr	6.9
Fjerde	Forlate bygget	10.4	Ringe brannvesenet	6.1
Femte	Kle på seg	10.1	Bekjempe brannen	5.8

[42]. At så mange barn dør som følge av lek med åpen ild, kan i mange tilfeller spores tilbake til handlingsmønsteret til barn når de blir reddet. Ofte blir de omkomne funnet på steder der de tydelig har forsøkt å gjemme seg. Grunnene til at barna gjemmer seg er basert på frykt [56]. Det barna frykter er irettesettelse av foresatte, samt flammene fra brannen. Når barn gjemmer seg, er det meget vanskelig å finne dem når det har oppstått en brann.

For voksne kan det være vanskelig å forstå at barna gjemmer seg når det har begynt å brenne. Det mest logiske for voksne ville være å rømme fra brannen, dersom den ikke kan slukkes. Her er det viktig å huske at barn ikke er voksne i miniatyr. Barn har mindre erfaring med farlige situasjoner, og har dermed mindre informasjon til å tolke farlighetsgraden av en brann. Med barns manglende erfaring, kan det være mer logisk å gjemme seg enn å rømme [27, 41]. De fleste barn er vant med at dersom de venter vil det som oppfattes som farlig eller truende, forsvinne etter en stund. Dette kan være årsaken til en del av de dødsfallene en ser blant barn.



Figur 1.3: Antall omkomne for årene 2010, 2011 og 2012 fordelt på kjønn [19].



Figur 1.4: Antall omkomne pr. hundretusen innbyggere for årene 2010, 2011 og 2012 fordelt på kjønn [19].

1.2.4 Aldersfordeling

Antall menn som dør som følge av brann, er jevnt fordelt blant alle aldersgruppene. Det som er verdt å merke seg er at antall døde blant eldre menn er uforholdsmessig høyt i forhold til andelen av befolkningen over 60 år. Det er også interessant at menn mellom 20 og 40 år har en betydelig høyere sannsynlighet for å dø i brann enn det kvinner i den samme aldersgruppen har. Forklaring på denne forskjellen ligger igjen i det ulike reaksjonsmønsteret mellom menn og kvinner.

Det statistiske materialet viser et økende antall eldre som omkommer i brann (se figur 1.3). At flere eldre dør i brann er en meget urovekkende trend fordi antallet eldre i Norge er økende. Uten tiltak for å ivareta eldres sikkerhet, må det forventes at antallet døde som følge av brann over 60 år øker som en følge av økt levealder.

Det er et naturlig ønske blant eldre å bo i sin egne boliger så lenge som mulig. Utfordringene er at disse boligene ikke er tilrettelagt for personer som har vansker med å bevege seg, eller som ikke er i stand til å reagere hurtig nok på farene som oppstår ved brann [2]. For å sikre de eldre mot brann, må det iverksettes forebyggende tiltak. Disse tiltakene må i stor grad innrettes etter behovene til den enkelte person. Mulighetene kan være alt fra å utføre en del små tiltak i hjemmene, til i verste fall å flytte noen av de eldre til steder hvor det er tilsyn hele døgnet. Strakstiltak kan for eksempel være å installere tidsbrytere på komfyrer som gjør at strømmen blir slått av etter en viss tid. Andre tiltak kan være å flytte soverom o.l., slik at det ikke vil være behov for å benytte trapper, stiger eller tau for å rømme. Alternativt kan der installeres mobile slukkeanlegg som f.eks. vanntåkeanlegg. Undersøkelser viser at mobile vanntåkeanlegg kan hindre overtanning og dermed redusere sannsynligheten for død ved brann [1, 23]. Mer permanente løsninger kan være å installere boligsprinkleranlegg.

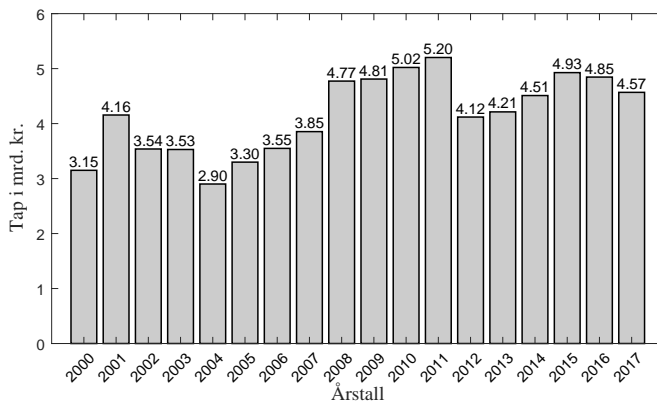
1.2.5 Universell utforming

Kravene til universell utforming av byggverk gir funksjonshemmede mulighet til i større grad å bruke offentlig tilgjengelige bygg. Branntekniske gir dette noen utfordringer i forbindelse med rømning og utforming av rømningsveier [77]. Samtidig gjør kravene til universell utforming at det blir et sterkere fokus på å tilrettelegge for rømning av alle brukere i et bygg. Dette fokuset har vært mangelfullt tidligere. I USA er funksjonshemning en medvirkende årsak i 14 % av dødsbrannene [30]. Det eksisterer ikke tilsvarende statistikk i Norge, men det må forventes at tilsvarende tall også er gjeldende her i landet.

1.3 Tap av økonomiske verdier

1.3.1 Verditap

De økonomiske tapene i Norge som følge av brann, holdt seg relativt stabilt rundt 3,5 mrd kr på begynnelsen av 2000-tallet. Tallene fra de siste åtte årene viser en økning i de økonomiske tapene til over 4 mrd kr (se figur 1.5). Tapstallene er basert på forsikrings-selskapenes skadeutbetaling p.g.a. brann. Økningen av tapene de siste årene kan bety at det ikke fokuseres sterkt nok på brann her i Norge.



Figur 1.5: Økonomiske tap p.g.a. brann 2000 - 2016 [31].

1.3.2 Sammenligning med andre land

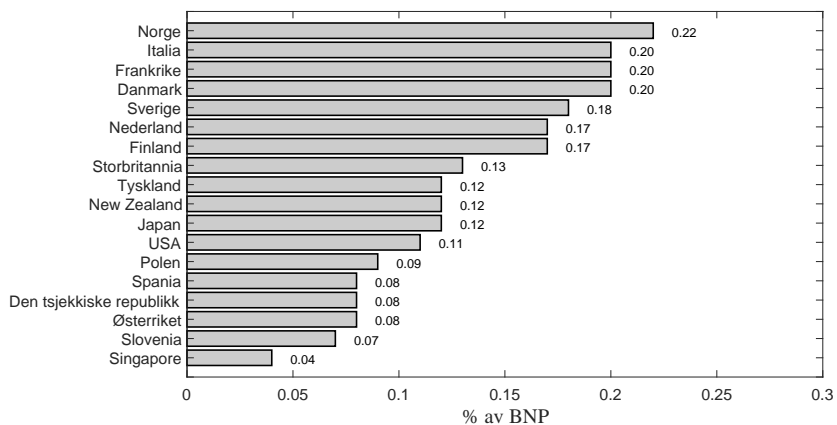
For å få en bedre forståelse av de økonomiske tapene som oppstår som følge av brann, er det ikke tilstrekkelig kun å undersøke de direkte årsakene til brannforløpene. Indirekte påvirkninger som holdninger, gammel praksis og andre faktorer må også vurderes.

Det er blitt samlet inn data over økonomiske tap som følge av brann i en rekke land. Tapstallene er blitt relatert til det enkelte lands brutto nasjonal produkt (BNP). Figur 1.6 viser forholdet mellom økonomiske tap og BNP i prosent. Norge er dessverre et av de landene i verden som har de høyeste økonomiske tapene som følge av brann [91].

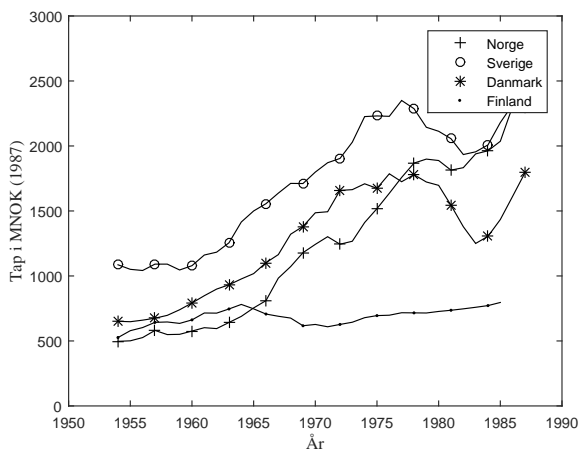
Som det fremgår av tallmaterialet har Norge relativt store tapstall i forhold til en del land som det vanligvis sammenlignes med [17]. Den innsamlede statistikken inkluderer forskjellige tallmateriale avhengig av land. Men selv om det er en del usikkerhet rundt disse statistiske tallene, viser tallene at Norge har større tap som følge av brann enn en rekke andre land.

Et annet viktig moment som brannstatistikken viser, er en økende trend i tap som følge av brann. Se figur 1.7 og 1.8; tallene er midlet over 5 år. Tall innsamlet av SINTEF² viser at Norge er det eneste landet i Norden som har en økning i tapstallene i forhold til BNP. Selv om Danmark, Finland og Sverige har økninger i utbetalingene til brannskadeerstatning, er det en reell nedgang i utbetalingene i forhold til BNP [17]. Nyere tall fra begynnelsen av 2000-tallet viser at Norge har 4 ganger så store erstatningsutbetalinger pr. innbygger sammenlignet med Finland [74]. Det er spesielt utbetalinger i forbindelse med boligbranner som er store i Norge.

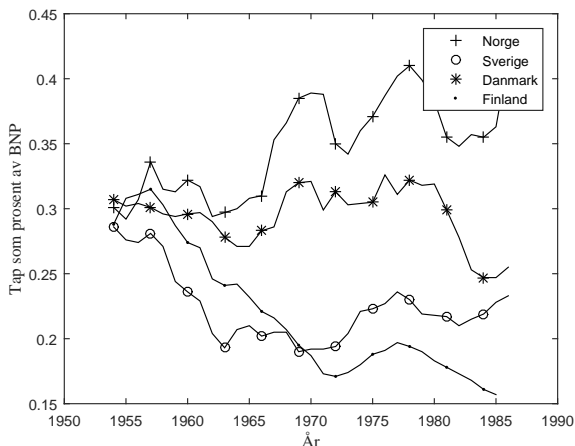
²Sintef Norges branntekniske laboratorium har nå byttet navn til RISE Fire Research.



Figur 1.6: Økonomiske tap i prosent av BNP [91].



Figur 1.7: Brannskadeerstatning for de nordiske land (i 1987 kr).



Figur 1.8: Brannskadeerstatning for de nordiske land i % av BNP.

1.3.3 Bakgrunn for verditapene

At de økonomiske tapene er større i Norge enn i resten av Skandinavia, ligger trolig i de strategiene som blir valgt for å bekjempe brann. SINTEF-rapporten “Brannskader i Norge” setter opp seks punkter som betegnes som viktige årsaker til de store tapene [17]. Punktene er gjengitt under.

- Stort omfang av store useksjonerte areal i industri og næringsliv helt uten sikringsiltak eller uten andre sikringstiltak enn brannventilasjon.
- Langt mindre utbredelse av sprinkleranlegg, spesielt i industri, lager og handelsvirksomhet.
- Stort omfang av store useksjonerte takareal med brennbare konstruksjoner. Det har ikke eksistert krav til konstruktive løsninger og materialkrav til takutstikk, og arealkrav har blitt omgått ved at bygningsråd har oversett eller omgått forskriftskravene.
- Lavt prioritert offentlig brannsyn. Det har vært avsatt små ressurser til dette arbeidet, og kompetansen hos de som utfører dette arbeidet er varierende.
- Manglende kontroll og oppfølging fra myndighetene (byggningsråd og brannmyndigheter) hvorvidt de eksisterende krav og pålegg etterleves.
- Manglende kontroll og oppfølging fra forsikringsselskapene hvorvidt de eksisterende krav og pålegg etterleves.

Mer generelt kan de seks punktene i SINTEF-rapporten deles inn i to grupper som beskriver de høye tapstallene:

- Manglende forståelse av brann som fenomen.
- Manglende interesse for å forebygge brann.

Selv om Sintef-rapporten er fra 1991, er momentene som trekkes frem like relevante i dag. DSB rapporterer at mange kommuner sliter med å kontrollere de byggene de er pålagt å kontrollere i henhold til brannloven og forebyggende forskriften [83]. Videre er det mange eksisterende bygg med utforming som beskrives i SINTEFs rapport, og det vil ta svært lang tid før disse byggene blir utbedret evt. at byggene blir revet og erstattet med nye bygg.

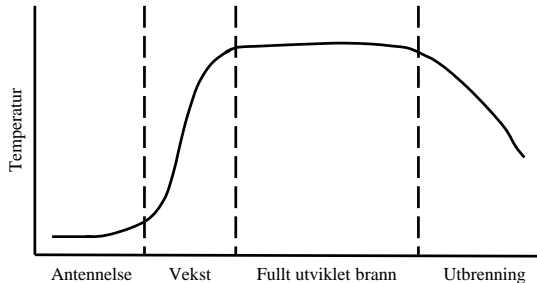
Del II

Brannutvikling

Kapittel 2

Brannforløp i rom og bygninger

En brann som får brenne fritt i et rom vil utvikle seg gjennom flere faser (Se figur 2.1.). Disse fasene er: antennelse, vekstfasen, fullt utviklet brann, utbrenning [26, 93]. En brann som er oppstått, vil ikke nødvendigvis gå igjennom alle fasene som er nevnt ovenfor. Svært ofte vil en brann bli slukket av automatiske slukkesystem, eller ved menneskelig inngripen. Slukking vil også inntreffe i de tilfeller hvor det ikke er tilstrekkelig mengde brennbart materiale eller luft i rommet hvor det brenner. Dette kapitlet vil gi en nærmere beskrivelse av de forskjellige fasene i brannforløpet.



Figur 2.1: Fasene i en brann.

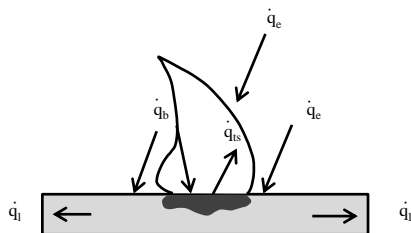
2.1 Brann i rom

For å få en god forståelse av fasene i en rombrann, vil det først bli gitt en generell beskrivelse av brannutviklingen i et rom.

En brann begynner i det små og utvikler seg som følge av varmetransport i og rundt materialet som brenner. I figur 2.2 er det illustrert hvordan en liten flamme sprer seg over en overflate som følge av varmestråling fra selve flammen (\dot{q}_b), eksternt varmestråling (\dot{q}_e) og varmeledning gjennom materialet (\dot{q}_l). Forbrenningssonen til flammen kan ha

temperaturer oppmot 1500 °C, og den høye temperaturen medfører at flammen stråler på materialet som brenner og varmer dette opp. Oppvarmingen vil medføre at materialet blir omdannet til gass som inngår i forbrenningen. Samtidig som materialet varmes opp og omdannes til brensel, vil det stråle tilbake til flammen og omgivelsene (\dot{q}_{ts}) og lede varme fra overflaten og innover i materialet (\dot{q}_l).

Dersom det brenner i et rom, vil røyken samle seg under taket og forme et røyklag¹. Røyklaget som blir dannet er svært varmt og vil stråle ned på materialet som brenner (\dot{q}_e) og øke produksjonen av brenselet. Dannelsen av det varme røyklaget er sentralt i økningen av brannstørrelsen fordi den kraftige varmestålingen fra røyklaget vil forvarme omliggende materialer.



Figur 2.2: Tilbakestråling fra flamme til omgivelsen.

Dannelsen av røyklaget skjer ved at varm røyk stiger oppover fordi den har mindre tetthet enn kald omliggende luft². I figur 2.3 er det illustrert hvordan røyken stiger oppover i røyksøylen inntil den treffer taket. Deretter sprer røyken seg utover under taket i det som omtales som en horisontal røykstrøm³. Når røykstrømmen treffer veggene i brannrommet blir røyken presset nedover og danner et røyklag. Etterhvert vil røyklaget øke i tykkelse og temperatur. Det varme røyklaget vil avgi varmestråling ned på overflatene under slik at alle brennbare flater antenner og det skjer en overtenning.

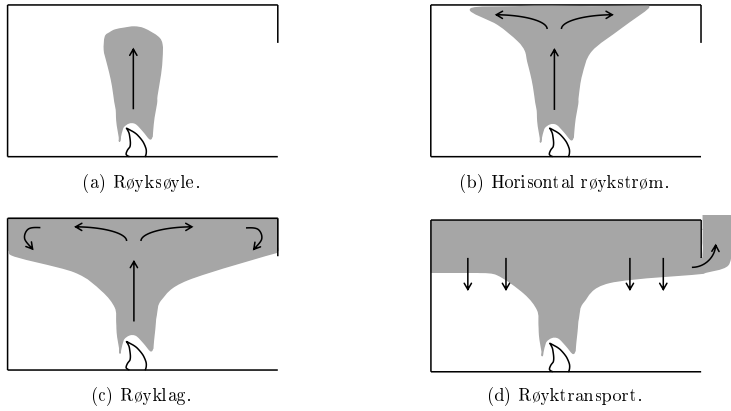
Røyksøylen består av varme røykgasser og medrevet luft som stiger oppover mot taket p.g.a. tetthetsforskjeller. Røyk består både av forbrenningsprodukter fra brannen, og luft som blir blandet inn i røyksøylen p.g.a. turbulens i de ytre delene av søylen. Hvor mye luft som blir blandet inn i røyksøylen er avhengig av brannens størrelse og røyksøylens høyde. I tabell 2.1 er det vist hvordan røykens volumstrøm endres med røyksøylens høyde. Endringen i volumet er kun et resultat av medrevet luft.

Selv om røyksøylen i stor grad består av luft, kan det være forbrenningsprodukt som er giftige eller virker irriterende. I forbindelse med rømning, er det karbonmonoksid

¹Røyklaget blir også omtalt som røyksjikt. Se www.kbt.no

²Unntaket kan være ved gløde- og ulmebranner, hvor energiproduksjonen er lav. Røyktemperaturen i disse tilfellene vil ofte være tilnærmet lik lufttemperaturen.

³Den horisontale røykstrømmen har også blitt omtalt som røykjet.



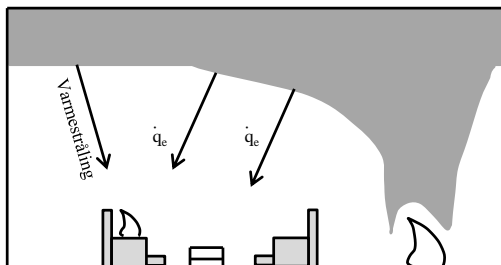
Figur 2.3: Røykfylling av et rom.

Tabell 2.1: Røykvolum som funksjon av høyde over brannen. Brannen tilsvarer en besinnbrann med et areal på 1 m^2 .

Høyde over brannen (m)	Røyk- volum (m^3/s)
2	3,7
4	7,6
6	14
8	22
10	31

(CO) som utgjør den største faren. I rundt 50 % av dødsfallene som er brannrelatert, er karbonmonoksid hovedårsaken til dødsfallene [60].

Det varme røyklaget er viktig i forbindelse med brannspredningen i selve brannrommet, fordi den varme røyken avgir store mengder varmestråling. Varmestrålingen som er gitt ved \dot{q}_e i figur 2.4, vil varme opp brennbare materialer i rommet slik at brannen sprer seg raskere. Bli materialene tilstrekkelig varme, kan det oppstå spontanantennelse, dvs. antennelse av materialer uten tennkilder som fyrstikker, flammer eller glør [26].



Figur 2.4: Varmestråling fra varmt røyklag.

Den videre utviklingen av brannen avhenger av hvorvidt det er store nok åpninger i rommet hvor røyken kan ventileres ut og luft slippes inn. Er rommet tilnærmet tett, vil brannen slukke av seg selv p.g.a. oksygenmangel [26]. Dersom det er åpne dører eller vinduer i rommet, vil røyklaget fylle den øvre delen av rommet helt til røyken når åpningene. Når den nedre delen av røyklaget når åpningene, vil røyk begynne å strømme ut av rommet, se figur 2.3d. Røyklagets høyde vil stabiliseres når røykproduksjonen er lik røykmengden som strømmer ut åpningene.

Varmestrålingen fra røyklaget vil forvarme brennbare materialer i rommet. Forvarmingen gjør at energibehovet ved antennelse minker og gjør brannen i stand til å spre seg hurtigere. Dette er viktig i de situasjonene hvor overgangen fra vekstfasen til fullt utviklet brann skjer svært hurtig (omtalt som overtenning). En brann som utvikler seg i et rom vil til slutt nå en størrelse der det ikke lenger er tilstrekkelig lufttilgang til en fortsatt økning av brannens varmeproduksjon⁴. Fullt utviklede branner vil fortsette å brenne til det begynner å minke på det brennbare materialet, for deretter å redusere i omfang.

Selve utbrenningsfasen til en brann kan vare svært lenge. Brannen vil ofte gå over til en glødebrann som forbrenner materialer svært langsomt. Denne langsomme forbrenningen gjør at utbrenningsfasen i mange tilfeller er den av fasene som varer lengst i en brann.

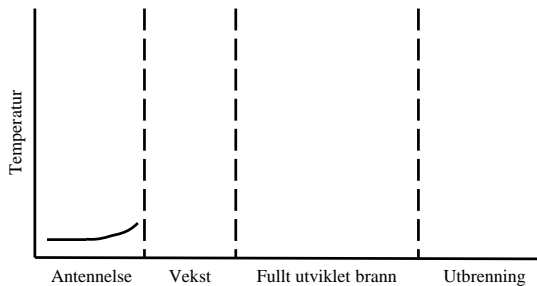
⁴En videre utvikling av brannen og varmeproduksjonen kan kun skje dersom brannen sprer seg til andre rom.

2.2 Fasene i en brann

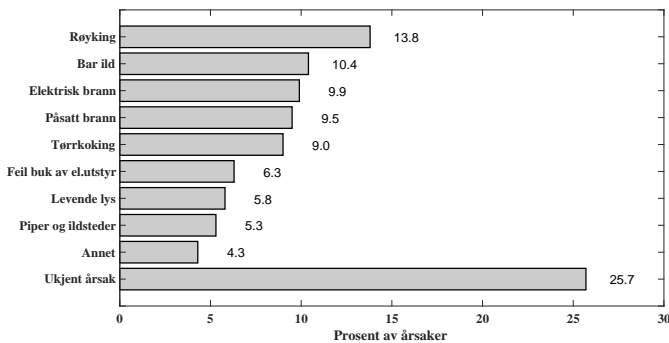
Fasene i en brann er beskrevet nedenfor. Hvor hurtig en brann utvikler seg eller hvor høye temperaturer som oppnås, vil variere fra brann til brann. Fasene er derfor beskrevet for å illustrere et fullstendig brannforløp.

2.2.1 Antennelsesfasen

En brann begynner ved at et fast stoff, gass eller væske blir antent (Se figur 2.5). Årsakene til antennelsen kan være mange som illustrert i figur 2.6. Det kan variere fra selvtantennelse til situasjoner der personer med viten og vilje starter en brann. Teorien for antennelse er beskrevet nærmere i kapittel 13 senere i boken.



Figur 2.5: Antennelsesfasen.



Figur 2.6: Prosentvis fordeling av brannårsaker ved dødsbranner i perioden 2001 - 2006.

I de fleste tilfeller av antennelse er det tilstede en tennkilde som for eksempel flammer fra fyrstikker, gnister eller glør. Denne form for antennelse blir ofte omtalt som pilot-antennelse etter det engelske begrepet: pilot ignition. I de tilfellene hvor det ikke er en tennkilde vil det være to forskjellige muligheter for antennelse. Den vanligste er spontan-antennelse, hvor en ytre kilde f.eks. varmestråling, varmer opp et materiale til det når en temperatur hvor det antenner og begynner å brenne. Denne temperaturen er omtalt som spontanantennelsestemperatur eller på engelsk autoignition temperature [26]. Den andre situasjonen blir omtalt som selvantennelse, hvor materialet selv produserer så mye energi at det antenner [26].

Det er svært lite varme eller energi som skal til for å starte en brann. I mange tilfeller vil fyrstikker, te-lys eller gnister ha tilstrekkelig med energi til å starte en brann. P.g.a. de små energimengdene som skal til for å starte en brann, må manglende tennkilder ikke brukes som argument for at brann ikke skal oppstå. Det kan oppstå situasjoner hvor det blir introdusert uforutsette tennkilder i et rom eller område. Et eksempel kan være taktekkere som benytter åpne flammer når det legges asfaltbasert belegget på tak. Åpne flammer er ikke vanlig på tak og er lett å overse i forbindelse med risikovurderinger.

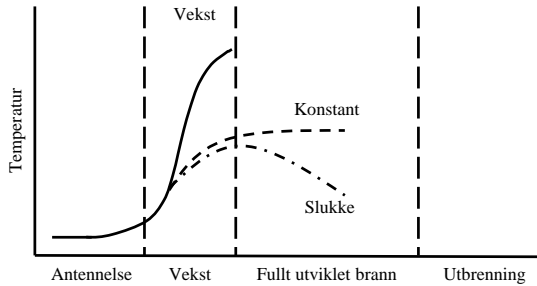
I forbindelse med branntekniske analyser er det vanskelig å simulere antennesfasen. Grunnen er at i mange situasjoner vil det ta meget lang tid for en brann utvikler seg og fordi det er stor usikkerhet forbundet med plasseringen av arnestedet. P.g.a. den sakte utvikling av brannen, er det vanskelig å anslå forbrenningshastigheten av materialet som er involvert. Unntaket er når det er brennbare gasser eller væsker som blir antent. I disse situasjonene går antennesen relativt hurtig. Ved numerisk simulering⁵ av en brann, blir det bare antatt at brannen er oppstått. Dermed ignoreres selve antennesfasen. Numeriske simuleringer av branner begynner med vekstfasen av brannen og ikke med antennesen.

2.2.2 Vekstfasen

Når antennesen har funnet sted, vil brannen utvikle seg og vokse, se figur 2.7. Hvor stor brannen vil bli og hvor raskt den utvikler seg er avhengig av flere faktorer. Den viktigste faktoren i vekstfasen er tilgangen på brennbart materiale i gassform [26]. Aggregattilstanden til materialene spiller en viktig rolle i mengden gass som avgis av brennbare materialer. Gasser og væsker brenner lettere enn fast stoff, fordi fast stoff først må varmes opp og omdannes til gass før det kan brenne (Se figur 11.3 i kapittel 11). Det at fast stoff først må varmes opp, gjør at brannen må produsere relativt mer varme for å opprettholde forbrenningen.

En brann i vekstfasen kan utvikle seg på tre forskjellige måter: slukke, brenne konstant eller vokse [26, 93] (Se figur 2.7.). Dersom brannen forbruker mer gass enn den er i stand til å produsere, vil brannen gå til utbrenningsfasen og slukke. Når brannen produserer og forbruker like mye gass, vil den forbli konstant. Utviklingen av brannen vil kun skje dersom brannen er i stand til å øke produksjonen av brennbare gasser [26].

⁵I forbindelse med brannsikring av bygg, branntekniske forsøk o.l. kan det være hensiktsmessig å bruke datamodeller for å beskrive et brannscenario. Disse datamodellene bruker numeriske beregninger for å beskrive et brannforløp, herav begrepet numeriske simuleringer.

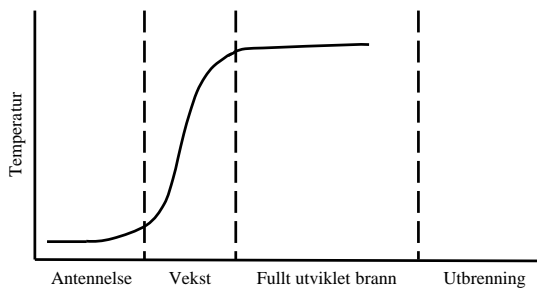


Figur 2.7: Vekstfasen.

Beskrivelsen ovenfor viser at i denne fasen er brannens størrelse svært avhengig av mengden brennbar materiale. P.g.a. dette avhengighetsforholdet, blir brannen beskrevet som brenselskontrollert. Brannen vil fortsette å vokse til den involverer alt brennbar materiale i rommet. Denne situasjonen kalles fullt utviklet brann.

2.2.3 Fullt utviklet brann

En fullt utviklet rombrann kan ikke bli større uten å spre seg til andre rom, se figur 2.8. I slike situasjoner kan det ofte observeres at røyken som kommer ut av brannrommet antennes på utsiden [26, 59]. Grunnen til at røyken antenner på utsiden av rommet er en følge av manglende oksygen i brannrommet. I praksis vil dette si at åpningene i brannrommet, som for eksempel dører og vinduer, ikke er store nok til å slippe inn tilstrekkelig med luft til at all gass kan forbrenne inne i brannrommet. De varme gassene fra brannen vil derfor forbrenne når de kommer i kontakt med oksygen på utsiden av brannrommet [59].



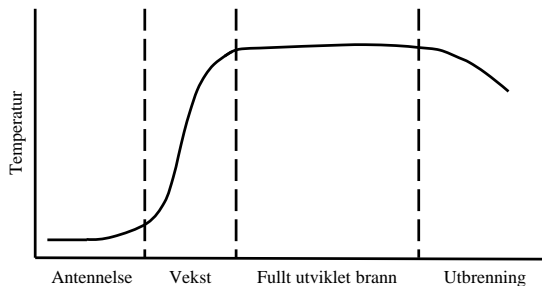
Figur 2.8: Fullt utviklet brann.

Den begrensede lufttilgangen medfører to ting. Det ene er at brannen blir ventilasjonskontrollert, dvs. at brannen ikke kan bli større enn det lufttilgangen tilsier. Størrelsen på brannen vil dermed bli begrenset av mengden oksygen som til en hver tid er tilgjengelig i brannrommet. Det andre resultatet av den begrensede lufttilgangen, er ufullstendig forbrenning av brenselet. Uforbrent gass strømmer ut av brannrommet, og gasser som har en temperatur som er høyere enn spontanantennelsestemperaturen, vil begynne å brenne når de møter luft med oksygen på utsiden av rommet [59]. Uforbrent gass som ikke antenner vil inngå i røyken fra brannen som sprer seg til andre deler av bygget hvor det ikke brenner. Komponentene i de uforbrente branngassene kan være meget giftige og kan utgjøre en betydelig fare for dem som oppholder seg i bygget.

En fullt utviklet brann har et meget stort forbruk av brennbart materiale. Det store forbruket av materialer vil til slutt medføre at nesten alt brennbart materiale vil være forbrent, og brannen vil begynne å minske i omfang. Brannen har da gått over i utbrenningsfasen.

2.2.4 Utbrenningsfasen

Utbrenning inntreffer når mengden brennbar gass er redusert slik at brannens omfang ikke kan opprettholdes, se figur 2.9. Dette skjer når mengden brennbart materiale som pyrolyserer⁶ reduseres [59].



Figur 2.9: Utbrenningsfasen.

Utbrenningsfasen blir også omtalt som avkjølingsfasen⁷. Dette er beskrivende for det som skjer med temperaturen i denne fasen av brannen. Temperaturen i rommet hvor brannen opptrer, vil reduseres ettersom brannens energiproduksjon reduseres. Avkjøling spiller også en avgjørende rolle i forbindelse med slukking. Dersom en brann blir aktivt

⁶I brannteknisk litteratur blir begrepet pyrolyse brukt om dekomponering av materialer både med og uten oksygen tilstede. Innen andre fagdisipliner f.eks. innen forbrenning, blir pyrolyse brukt om dekomponeringen uten oksygen tilstede [4].

⁷I denne boken er begrepet utbrenningsfase brukt fordi det fremdeles er energiproduksjon i denne fasen. Begrepet avkjølingsfase dekker ikke energiproduksjon men kun varmetap. Se forøvrig www.kbt.no.

avkjølt, vil dette gjøre at brannforløpet blir svært annerledes enn ved en fritt brennende brann.

Det blir ofte antatt at når en brann reduseres i omfang, så bortfaller sannsynligheten for strukturelle ødeleggelser og tap av menneskeliv. Dette er svært ofte tilfellet, men ikke alltid. Det kan oppstå situasjoner hvor det er svært høye temperaturer i begrensede områder i bygget, og her kan det også oppstå skader på konstruksjonene p.g.a. varmpåkjenning [26]. Utbrenningsfasen kan vare svært lenge, og bør ikke undervurderes i forbindelse med risikoanalyser.

2.3 Fenomen i brann

I tillegg til de fire fasene som er i en brann, inngår fenomenene overtenning, backdraft og pulsering i begrepene som beskriver et brannforløp.

2.3.1 Overtenning

Overtenning beskriver en meget rask overgang fra vekstfasen til fullt utviklet brann, se figur 2.10 [26, 59]. Overtenning blir ofte omtalt som en av fasene i en brann, men dette er ikke riktig fordi overgangen mellom vekstfasen og fullt utviklet brann også kan skje uten overtenning dvs. saktere brannutvikling [25, 59]. Det som kjennetegner overtenninger er at alle brennbare flater, samt røyklaget under taket, antenner omtrent samtidig, dvs. et meget hurtig brannforløp. Dersom brannen utvikler seg sakte⁸ inntreffer det ikke en overtenning, men brannen vil allikevel kunne utvikle seg fra vekstfasen og til en fullt utviklet rombrann.

Når overtenning inntreffer, blir det en kraftig økning i varmeproduksjonen. Forholdene rundt overtenninger er ikke klarlagt. Usikkerhetene omkring mekanismene til overtenninger har gjort det nødvendig å bruke indirekte kriterier for å vurdere om det vil oppstå overtenning i et rom [59]. Vanligvis blir ett av de tre følgende kriteriene lagt til grunn for å vurdere hvorvidt det er oppstått overtenning [26, 59]:

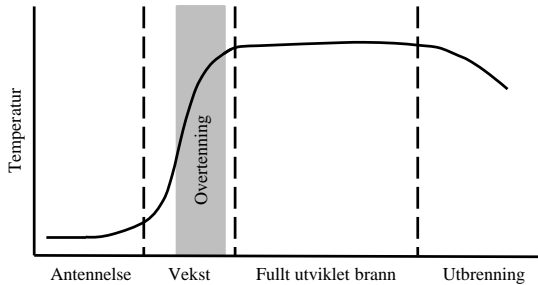
- Temperaturen i røyklaget overstiger 500 - 600°C.
- Varmestrålingen fra røyklaget til gulvflaten overstiger 20 kW/m².
- Flammer observeres på utsiden av brannrommet.

Av kriteriene er det varmestrålingen på 20 kW/m² som er det mest konservative⁹ av de tre.

Det er viktig å finne ut når overtenning vil inntreffe, fordi dette har stor betydning for vurderingen av personsikkerheten til dem som oppholder seg i bygningen hvor det brenner. Fra et personsikkerhetsperspektiv må bygget eller seksjonen i bygget være evakuert før overtenning inntreffer. Sikkerheten til personalet i brannvesenet må også vurderes.

⁸Fra 1970-tallet ble det innført mye plastprodukt i møbler etc. Etter dette er det skjedd at en brann ikke utvikler seg med overtenning.

⁹Det vil i dette tilfellet si den hendelsen som inntreffer først.



Figur 2.10: Overtening.

Det at en brann går fra vekstfasen til en fullt utviklet brann, medfører som oftest at brannen går fra å være brenselskontrollert til å bli ventilasjonskontrollert. Dette betyr igjen at det vil oppstå ufullstendig forbrenning hvor det vil bli produsert en rekke stoffer som er skadelige for mennesker. Produksjonen av disse giftige stoffene vil ha en sterk påvirkning på sikkerheten til de som skal rømme bygningen.

2.3.2 Backdraft

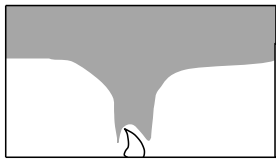
I spesielle tilfeller kan det dannes luft-gassblandinger som ved antennelse vil ha et meget hurtig brannforløp. Den hurtige forbrenningen og tilhørende ildkule ut av dør eller vinduer omtales som backdraft¹⁰. Se figur 2.11.

I noen tilfeller hvor det er store mengder brennbar gass i et rom men lite oksygen, kan det dannes en brennbar luft-gassblanding dersom det skjer endringer i ventilasjonsforholdene i rommet [59]. Endringen av ventilasjonsforholdene vil kunne skje dersom vinduer eller dører åpnes. Når luft tilføres gjennom f.eks. vinduer eller dører, vil det bli dannet en blanding av luft og gass som kan antennes [32]. Dersom det skjer en antennelse, kan forbrenningen skje så hurtig at trykkøkningen i brannrommet presser brannen ut av rommet i form av en ildkule. At en ildkule presses ut av brannrommet ved en backdraft, gjør at spesielt brannkonstabler må være oppmerksom på dette fenomenet.

Backdraft kan forklares ut i fra følgende årsakssammenheng:

1. En brann slukker p.g.a. oksygenmangel, se figur 2.11a.
2. De brennbare materialene fortsetter å pyrolysere og fyller rommet med brennbar gass, se figur 2.11b.
3. En dør åpnes og slipper luft inn, se figur 2.11c.

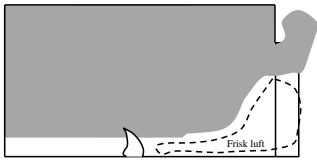
¹⁰Det er gjort flere forsøk på å finne et norsk uttrykk for backdraft. Et forsøk er Varm fet forbranning [7], men etter diskusjoner i KBT (Kollegiet for brannfaglig terminologi) blir det holdt fast på det engelske begrepet backdraft. Se www.kbt.no.



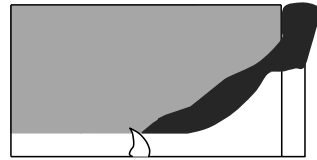
(a) Røykfylling.



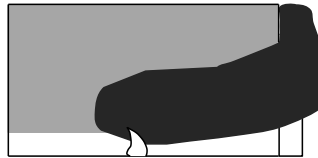
(b) Brannen slukker p.g.a. lite oksygen.



(c) Dør åpnes i brannrommet.



(d) Varm røyk presses ut av brannrommet og antenner på utsiden.



(e) Ildkule fra backdraft.

Figur 2.11: Backdraft.

4. Luft-gassblandingen antennes¹¹, se figur 2.11d.
5. Forbrenningsproduktene ekspanderer og skyver den brannbare gassen ut av rommet, hvor den blandes med luft og antennes og danner en ildkule, se figur 2.11d-e.
6. Dersom det er mye turbulens vil luft og gass bli godt blandet. Resultatet kan være en meget hurtig forbrenning ved antennelse. I noen tilfeller kan dette oppfattes som en eksplosjon.

2.3.3 Pulsering

Pulsering kan forekomme i rom hvor backdraft kan inntreffe. Dersom det er et rom med liten ventilasjon, kan det oppstå pulsering rundt ventilasjonsåpningene. En brann som ikke får nok oksygen, vil avta i intensitet. Når brannen avgir mindre varme, vil branngassene i rommet avkjøles og oppta mindre volum. P.g.a. dette oppstår det et undertrykk i brannrommet og for å utligne trykket, vil det strømme luft inn i rommet. Når luft strømmer inn, vil brannen få tilført nytt oksygen og øke forbrenningen. Dette vil medføre at gassene i rommet ekspanderer på nytt og ofte vil det komme flammeteringer ut ventilasjonsåpningene [64]. Denne syklusen omtales som pulsering.

Både backdraft og pulsering oppstår i underventilerte rom. Branngassene som produseres kan dermed ikke forbrenne fullstendig, og det kan oppstå situasjoner der store mengder uforbrent gass blir værende i rommet. Pulsering er en indikator for at backdraft kan oppstå. Det er derfor viktig for brannkostabler å gjenkjenne fenomenet med pulsering og farene for at en backdraft kan inntreffe.

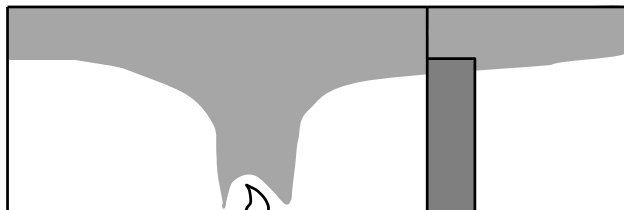
2.4 Brannspredning til andre rom og etasjer

Når brannrommet er fylt med varm røyk, vil det bli skapt et overtrykk i rommet som gjør at røyken blir presset ut av brannrommet og inn i andre rom. De omliggende rommene vil fylles med røyk på samme måte som i brannrommet, men lagdelingen mellom røyken og den vanlige luften vil være mindre klar p.g.a. mindre temperaturforskjeller (Se figur 2.12). Dersom røyken blir presset ut i sjakter eller trapperom, vil røyken stige oppover i bygget. I toppen av sjakten eller trapperommet vil røyken danne et røyklag som medfører at røyken blir presset ut i toppetasjene i bygget. Etterhvert vil også disse etasjene fylles med røyk (Se figur 2.13).

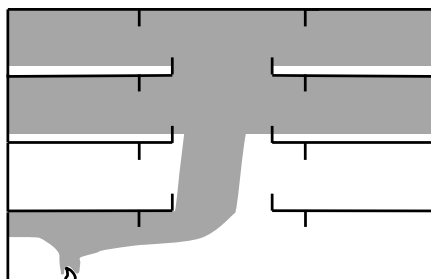
Spredning av flammer fra brannrommet til andre rom og etasjer vil ta lengre tid enn røykspredningen. Flammer trenger større åpninger¹² enn røyk for å spre seg. Åpne dører og vinduer er vanlige spredningsruter for flammene i en brann. En brann kan også brenne seg igjennom dører, vegger og tak for på den måten å selv skape åpninger hvor den kan spre seg.

¹¹Dette fordrer tilstedeværelsen av en tennkilde eller at de brennbare gassene er så varme at de spent anantenner.

¹²Dersom åpningene blir for små vil gassene i flammene kjøles så mye ned at flammen slukker og brannen kan ikke spre seg.

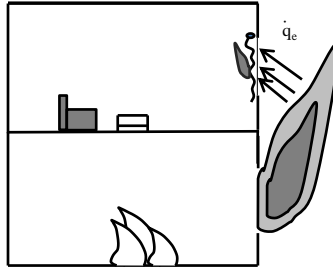


Figur 2.12: Røykspredning mellom rom via dør.



Figur 2.13: Røykspredning mellom etasjer via åpent atrium.

En brann kan også bryte ut gjennom vinduene i brannrommet og bidra til brannspredning til ovenforliggende etasjer via utsiden på bygget. Dette skjer når flammene som kommer ut fra brannrommet avgir så mye varmestråling til rom i ovenforliggende etasjer at objekter i disse rommene, f.eks. gardiner, antenner, se figur 2.14. Antennelsen i de ovenforliggende rommene kan medføre rombranner som fører til brannspredning både i den aktuelle etasjen og videre i etasjene som ligger oppover i bygget.



Figur 2.14: Flammespredning til andre etasjer når varmeståling antenner gardiner i etasjen over.

2.5 Brannspredning til andre bygninger

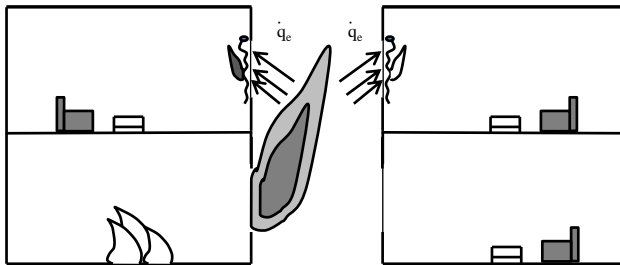
En brann som brenner på utsiden av et bygg, har et potensial til å spre seg til andre bygg eller omliggende områder. Spredningen vil være et resultat av varmestråling eller flyvebranner.

2.5.1 Varmestråling

Varmestråling kan føre til at en brann sprer seg fra ett bygg til et annet. Hvorvidt varmestrålingen er kraftig nok til å antenne nabobygg, er avhengig av hvor kraftig varmestrålingen er og hvor stor avstand det er mellom byggene. Intensiteten¹³ til varmestrålingen som treffer nabobygget er et resultat av både avstand mellom byggene og hvor kraftig varmestrålingskilden er. Litt grovt kan det sies at dersom en avstand doubles, så reduseres intensiteten til en fjerdedel.

I Norge er minste avstanden mellom to bygg regulert i forskrift til 8 meter. Dette er en avstand basert på erfaringsoverføring og er i stor grad relatert til bygninger som i størrelse og utforming er lik vanlige eneboliger. Blir avstanden mellom nabobygg mindre enn 8 meter, må det benyttes andre tiltak som f.eks. brannvegger, for å stoppe brannspredningen.

¹³Intensitet oppgis ofte med enheten W/m^2 , men innen branntekniske beregninger brukes som oftes kW/m^2 .



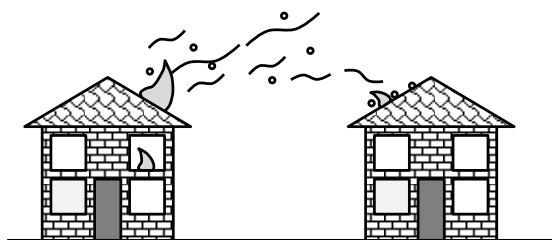
Figur 2.15: Varmestråling mot andre bygg.

Varmestråling kan antenne nabobygg både på ut- og innsiden. Skjer antennelsen på utsiden av nabobygget, må brannen ofte brenne seg igjennom kledning for så å antenne innsiden. Brannen vil dermed i mange tilfeller gjøre betydelige skader på utsiden av bygget og kun mindre skader på innsiden. I andre tilfeller vil varmemstrålingen antenne objekter på innsiden av nabobygget som f.eks. gardiner, og brannen vil spre seg som en rombrann i dette bygget.

2.5.2 Flyvebranner

Når det brenner i trebygninger¹⁴ kan det i noen tilfeller bli dannet gnister som kan spre brannen til andre bygg eller områder. Spredningen via gnister omtales som flyvebranner og er avhengig av at gnisten blir transportert over kortere eller lengre avstander. Gnistene vil i mange tilfeller bli transportert av oppadgående luftstrømmer som brannen selv skaper eller ved at sterk vind river med seg gnistene. Gnistene vil kunne transporteres mange hundre meter og fremdeles være varme nok til å antenne materialer der de lander. Ett godt eksempel på denne type brann er Lærdalsbrannen i 2014. Her spredte brannen seg via gnister og i alt 40 bygninger ble totalskadet i brannen [20].

¹⁴Eller i busker og trær i forbindelse med skogbranner.



Figur 2.16: Flyvebrann.

Del III

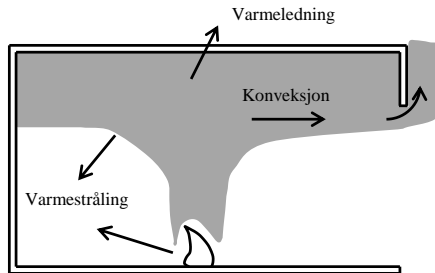
Varmelære

Kapittel 3

Varmelære

3.1 Introduksjon

Ved et branntilløp vil det bli produsert store mengder energi. Energien transporteres vekk fra selve brannen som følge av varmeledning, konveksjon og varmestråling. Energien fra brannen vil påvirke omliggende områder, avhengig av hvor mye energi som transporteres til det enkelte område. Figur 3.1 viser hvordan energi transporteres fra en brann og til den omliggende konstruksjonen.



Figur 3.1: Varmetransport som følge av brann.

Før metodene for varmetransport blir beskrevet, er det viktig å ha et felles begrepsapparat som kan brukes for å beskrive de forskjellige formene for varmetransport. I dette kapitlet vil det bli gitt en kort introduksjon i termodynamikk og varmelære.

3.2 Energi og varme

Energi og varme er to begreper som ofte brukes om hverandre. Men selv om begrepene er tett knyttet til hverandre, er det en vesentlig forskjell i hva begrepene beskriver. Varme

er definert som energi som strømmer fra et varmt til et kaldt sted p.g.a. temperaturforskjeller [26]. Begrepet energi er vanskeligere å definere og det blir brukt forskjellige uttrykk for å beskrive ulike energiformer f. eks.: gravitasjonsenergi, elektrisk energi, kjemisk energi, atomenergi og strålingsenergi [47]. Formene for energi kan deles inn i tre mer generelle former: kinetisk energi, potensiell energi og indre energi [40, 47].

3.2.1 Kinetisk energi

Kinetisk energi er relatert til et objekts masse og hastighet, se ligning 3.1 [40, 43].

$$\text{KE} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.1)$$

hvor:

KE er kinetisk energi (J)

m er objektets masse (kg)

v er objektets hastighet (m/s)

Ligning 3.1 kan brukes for både store og små objekter, f. eks. en ball eller et gassmolekyl.

3.2.2 Potensiell energi

Potensiell energi er relatert til den energien som frigjøres når et legeme forskyves i en krafts retning. Det klassiske eksemplet er tyngdekraftens påvirkning av et legeme, se ligning 3.2 [43].

$$\text{PE} = mgh \quad (3.2)$$

hvor:

PE er potensiell energi (J)

m er objektets masse (kg)

g er tyngdekraftens akselerasjon, oppgis vanligvis til 9,81 m/s²

h er høyden objektet er forflyttet (m)

3.2.3 Indre energi

Indre energi er relatert både til den kinetiske og den potensielle energien til partiklene i et system, f. eks. hastigheten til molekylene i en gassblanding eller temperaturen. For å endre den indre energien til et system, må systemet tilføres energi eller systemet må gjøre arbeid på omgivelsene [40, 43, 47]. Se ligning 3.3 og figur 3.2.

$$\Delta U = U_E - U_F = q - W \quad (3.3)$$

hvor:

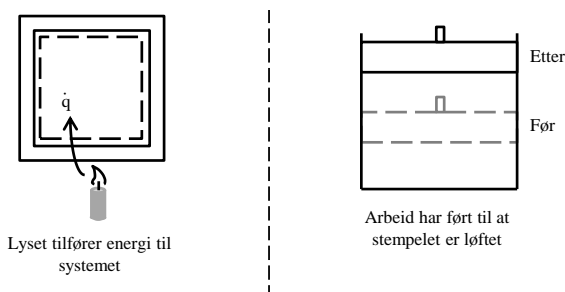
ΔU er endringen i indre energi (J)

U_F er indre energi før systemet er påvirket (J)

U_E er indre energi etter at systemet er påvirket (J)

q er energi som tilføres systemet (J)

W er arbeid utført av systemet (J)



Figur 3.2: Illustrasjon på energitilførsel og arbeid.

Energi (q) tilføres eller tas ut av systemet, se figur 3.2 [40]. Dersom energi tilføres et system får q en positiv tallverdi, men når energi tas ut av systemet får q en negativ tallverdi [40]. I figur 3.2 er det illustrert hvordan et stearinlys tilfører energi til et system og hvor q er positiv. Et eksempel innen brann kan f.eks. være en kjemisk reaksjon som produserer energi og varmer opp omgivelsene. Her taper systemet energi til omgivelsene, dvs. negativ q . Arbeid (W) kan f. eks. være et gassvolum som løfter et stempel, se figur 3.2. I de tilfellene systemet utfører arbeidet, dvs. løfter stampelet, vil W være positivt. Men dersom omgivelsene utfører arbeidet på systemet, dvs. presser stampelet ned, vil W være negativ. Både energitilførselen og arbeidet som utføres, blir definert når de krysser grensene for det systemet som vurderes [40].

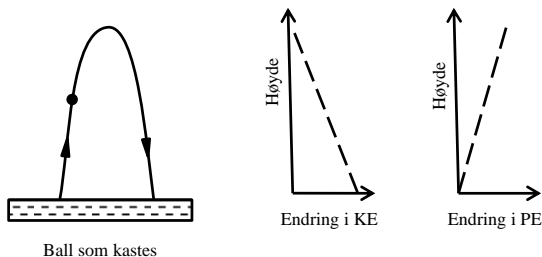
3.3 Termodynamikk

Termodynamikk benyttes for å beskrive hvor mye energi et system kan produsere eller avgi, og er basert på to lover som er utviklet eksperimentelt. Den første loven er om konservering av energi og sier at energi kan omformes, men ikke forsvinne eller brukes opp [40]. Den andre loven beskriver hvilke begrensninger det er på energiovergangene. F. eks. vil en varm kopp med kaffe kjøles ned og ikke varmes opp dersom den står i et vanlig rom [40].

3.3.1 Termodynamikkens første lov

Energi kan opptre i forskjellige former og kan veksle mellom formene. Det at energi endrer form, men ikke forsvinner, omtales i termodynamikkens første lov som konservering av energi [40].

For å beskrive denne loven blir det tatt utgangspunkt i et eksempel hvor kinetisk energi blir omgjort til potensiell energi. En ball blir kastet vertikalt oppover med gitt utgangshastighet v , se figur 3.3. Ved utgangspunktet vil ballen ha en viss mengde kinetisk energi, mens den potensielle energien vil være null. Etter hvert som ballen stiger i sin bane, vil hastigheten v reduseres og den kinetiske energien vil reduseres tilsvarende. Samtidig vil den potensielle energien øke fordi ballen beveger seg oppover mot tyngdekraften. Når ballen har nådd det høyeste punktet i sin bane, vil den kinetiske energien være null og den potensielle energien vil være på sitt maksimale¹. Når ballen begynner å falle igjen, vil den potensielle energien bli frigjort og dermed øker den kinetiske energien igjen [43].



Figur 3.3: Endring i formen på energien.

Termodynamikkens første lov sier at energi ikke kan skapes eller gå tapt. Dvs. at energi ikke kan forsvinne, men kun omdannes til andre former for energi. I eksemplet med ballen vil all den kinetiske energien ved utgangspunktet bli omformet til potensiell energi ved toppunktet i ballens bane. Den første loven tilsier at summen av energiene ved både utgangspunkt og toppunkt skal være like, se ligning 3.4.

$$KE_1 + PE_1 = KE_2 + PE_2 \quad (3.4)$$

Den første loven kan gjøres mer generell ved å inkludere den interne energien i uttrykkene, se ligning 3.5 - 3.7.

$$U_1 + KE_1 + PE_1 = U_2 + KE_2 + PE_2 \quad (3.5)$$

$$\Delta U + \Delta KE + \Delta PE = 0 \quad (3.6)$$

$$q - W + \Delta KE + \Delta PE = 0 \quad (3.7)$$

¹Det ses vekk fra luftmotstand og eventuelt andre tap.

Termodynamikkens første lov er ikke bevist, dvs. det er ikke funnet noen termodynamiske systemer som oppfyller loven om fullstendig overføring av energi fra en form til en annen [43]. I praksis vil alltid noe av energien bli omdannet til energiformer som ikke kan tilbakeføres til den opprinnelige energiformen [40, 43]. I eksemplet med ballen vil noe av den kinetiske energien bli brukt til å varme opp ballen og luftmolekyler som følge av friksjon mellom ballen og luften. Det er ikke mulig å omforme denne varmen tilbake til kinetisk energi.

Den første termodynamiske loven er en teoretisk tilnærming til omforming av energi fra en form til en annen. Loven sier at summen av energien i objektet og omgivelsen til objektet skal være konstant. I eksemplet med ballen vil energien for hele systemet: ball og omgivelsen, være konstant, men energien kan ikke fritt ta på seg enhver form.

3.3.2 Termodynamikkens andre lov

I eksemplet med ballen i forrige avsnitt ble det hevdet at noe av ballens kinetiske energi ble omformet til friksjonsvarme, og at denne energien ikke kunne omformes tilbake til kinetisk energi. Termodynamikkens andre lov respekterer den første loven om konservering av energi², men denne loven sier at noen prosesser ikke er reversible og at energien dermed ikke kan tilbakeføres til sin opprinnelige form [40, 43]. Det vil bli gitt to eksempler og to formuleringer for å demonstrere den andre termodynamiske loven.

Før eksemplene blir gitt, blir uttrykket for den første loven³ satt opp igjen, se ligningene 3.8 og 3.9. Arbeid kan beskrives som en kompresjon eller ekspansjon av en gass, og dette er beskrevet i uttrykket $\Delta W = p\Delta V$.

$$\Delta q = \Delta U + \Delta W \quad (3.8)$$

$$\Delta q = \Delta U + p\Delta V \quad (3.9)$$

hvor:

Δq er tilført energi (J)

ΔU er endring i indre energi (J)

ΔW er utført arbeid (J)

p er trykk (Pa)

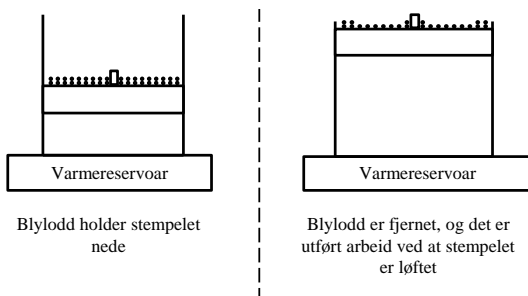
ΔV er endring i volum (m^3)

²Konservering av energien tilsier at mengden energi er konstant, men det sies ingenting om hvilken form energien har.

³Endringene i kinetisk og potensiell energi er antatt å være lik null i disse eksemplene. Dermed blir det lettere å se resultatet av den andre termodynamiske loven.

Sylinder med varmereservoar

I dette eksemplet blir det tatt utgangspunkt i et gassvolum inne i en sylinder med et stempel. Sylinderen står på et varmereservoar med konstant temperatur. Stempelet blir holdt nede av en rekke små blylodd, se figur 3.4. I utgangspunktet er både volumet og temperaturen i sylinderen konstant. Dvs. den indre energien (ΔU) i gassvolumet er konstant siden det ikke utføres arbeid på volumet ($\Delta W = 0$) eller tilføres energi ($\Delta q = 0$).



Figur 3.4: Sylinder med varmereservoar.

Dersom de små blyloddene blir tatt bort ett etter ett, vil gassvolumet øke fordi det er mindre masse som holder stempelet nede. Volumøkningen vil medføre at gassen kjøles ned, og for å kompensere for dette må det hentes energi fra varmereservoaret. Dette betyr at varme (q) er omformet til arbeid (W), se ligningene 3.10 og 3.11. Dersom temperaturen i gassen skal være konstant, må den indre energien være konstant dvs. $\Delta U = 0$.

$$\Delta q = \Delta U + p\Delta V \quad (3.10)$$

$$\Delta q = 0 + p\Delta V \quad (3.11)$$

Dersom dette er en reversibel prosess, skal det være mulig å komprimere gassen tilbake til det opprinnelige volumet og få ut like mye energi som ble tilført systemet⁴. Forsøk viser at dette ikke er mulig fordi noe av energien vil gå til å varme opp bl.a. sylinderen rundt gassen, og denne energien kan ikke gjenvinnes. Den indre energien (ΔU) i ligning 3.11 er dermed forskjellig fra null, og **den andre termodynamiske loven kan dermed formuleres som at arbeid ikke kan overføres til varme uten at noe energi blir tapt til omgivelsene** [40, 43].

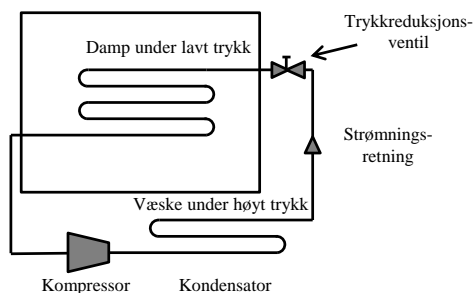
Kjøleskap

Et annet eksempel på termodynamikkens andre lov er hvordan kjøleskap virker. Her blir energi trukket ut av et kaldt område og overført til et varmere område. Dette er ikke en

⁴Dette vil en forvente utfra den første termodynamiske loven.

naturlig varmeovergang, og det må være en kompressor som gjør et arbeid på systemet for at denne varmeovergangen skal kunne oppstå. I et kjøleskap blir kjølevæske under høyt trykk omdannet til damp ved å redusere trykket. Trykkreduksjonen skjer over en strupeventil [40]. Denne trykkreduksjonen og dannelsen av damp krever energi som blir trukket ut av luften inne i kjøleskapet og overført til dampen av kjølevæsken. Den kalde kjølevæsken i dampform blir transportert ut av kjøleskapet, og blir komprimert i en kompressor. Komprimeringen gjør at dampen går over til væske via abredet $W = p\Delta V$, samt at væsken fått økt indre energi p.g.a. temperaturøkning. Den komprimerte kjølevæsken går så gjennom en kondensator hvor den mister energi til den omliggende luften, se figur 3.5 [21].

Den andre termodynamiske loven kan dermed formuleres som at energi ikke kan strømme fra et kaldt område til et varmt område uten at det utføres arbeid på systemet [40, 43].



Figur 3.5: Illustrasjon av kjøleskap.

3.4 Varmetransport

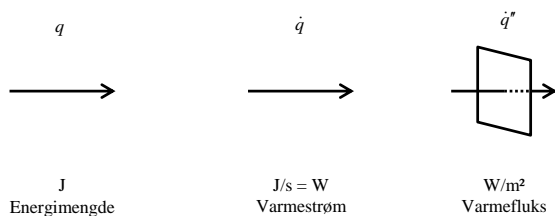
Energi som transporteres fra varme til kalde områder er definert som varme og omtales som varmetransport [40, 64]. Energien kan bli transportert på tre forskjellige måter. Den dominerende transportmetoden er avhengig av aggregattilstanden⁵ til det materiale som energien transporteres gjennom. Varmeledning skjer i faste stoffer, væsker og gasser. Selve varmetransporten skjer ved at energirike molekyler støter bort i molekyler med mindre energi og overfører kinetisk energi. Varmeledning er den dominerende varmetransportmetoden for faste stoffer, p.g.a. molekyl-tettheten [40].

For gasser og væsker vil konveksjon være den dominerende transportmetoden. Konveksjon skjer ved at varme og kalde gasser/væsker blander seg med hverandre, og ved at kinetisk energi overføres fra energirike til energifattige molekyler [40, 67]. Varmestråling

⁵Aggregattilstandene er fast stoff, væske, gass og plasma. Plasma forekommer ved svært høye temperaturer ($T > 10000$ °C) og kan ses bort fra ved vanlige temperaturer som forekommer ved brann.

er elektromagnetiske bølger som beveger seg i gasser, væsker og faste materialer [67]. Stråling skiller seg fra varmeledning og konveksjon fordi det ikke er behov for et medium til å transportere energien igjennom [40].

Når energi transporteres mellom to stoffer eller objekter, blir dette kalt varmeovergang. Et eksempel på dette vil være når energi blir transportert fra et varmt røyklag til et kaldere tak. Energimengden som transporteres blir angitt i Joule (J) og blir omtalt som varmemengden. Varmemengden har vanligvis betegnelsen q , se figur 3.6. Varmemengden som transporteres pr. tidsenhet blir kalt varmestrøm og har enheten Watt (W). Varmestrømmen betegnes med \dot{q} , hvor prikken over q indikerer at varmetransporten skjer med hensyn til tid. Varmestrømmen som treffer et gitt areal⁶ blir kalt varmestrømstetthet eller varmeffluks og har enheten W/m^2 [52, 67]. Varmeffluks betegnes \dot{q}'' , hvor tødlene bak \dot{q} indikerer at varmetransporten skjer med hensyn til areal.



Figur 3.6: Illustrasjon av begrep innen varmelære.

Når et materiale skal varmes opp, må det tilføres energi. Varmemengden som må tilføres for å varme opp et kilo av et material en grad Celsius, kalles spesifikk varmekapasitet og betegnes c og har enhet $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$. Den spesifikke varmekapasiteten er enten relatert til konstant trykk (c_p) eller konstant volum (c_v). Innen brannvern er ofte trykket konstant og c_p brukes ofte i den forbindelsen. Innen eksplosjonssikring er det situasjoner hvor volumet er konstant og da brukes c_v . For ideelle gasser er $c_p = c_v + R$. I tabell 3.1 er det oppgitt spesifikk varmekapasitet for enkelte materialer [67].

Stasjonær og transient er to viktige begrep innen varmelære⁷. Når energi transporteres kan dette skje i systemer som har stabilisert seg med hensyn til temperatur, eller i systemer hvor temperaturen endres over tid. Systemer som har stabilisert seg omtales som stasjonære, mens de systemene hvor temperaturen endres over tid omtales som transiente.

I stasjonære systemer kan det settes opp en forenklet energi-betraktning som tilsier at mengden energi som strømmer inn i et system tilsvarer den samme mengden som strømmer ut.

⁶Arealet kan også være virtuelt.

⁷Begrepene brukes også innen andre tekniske fagfelt.

Tabell 3.1: Spesifikk varmekapasitet [50].

Materiale	Spesifikk varmekapasitet c_p (J/(kg \cdot °C))
Luft	1005
Vann	4179
Bly	130

$$\mathbf{Energi}_{inn} = \mathbf{Energi}_{ut}$$

For transiente systemer må det settes opp en energi-betraktning som i tillegg til energi som strømmer inn og ut av systemet også må inkludere energiproduksjonen i systemet, samt lagring av energi.

$$\mathbf{Energi}_{inn} + \mathbf{Generert\ energi} = \mathbf{Energi}_{ut} + \mathbf{Lagret\ energi}$$

Både stasjonære og transiente varmetransportssystemer vil bli omtalt senere i boken.

Kapittel 4

Brann- og varmetransport

En brann som får brenne fritt, vil først utvikle seg i det rommet hvor brannen starter. Deretter vil brannen spre seg videre til både andre rom og etasjer. Tilslutt kan brannen bryte ut til utsiden av bygget hvor det brenner og spre seg til andre bygg eller omgivelser.

I dette kapitlet vil det bli beskrevet hvordan en brann kan spre seg, og hvilke mekanismer som ligger til grunn for spredningen. Som det fremgår av beskrivelsene i dette kapitlet er det nær sammenheng mellom brannspredning og varmetransport¹.

4.1 Mekanismer for brannspredning

En meget viktig faktor for at en brann skal kunne spre seg er forvarming av brennbare materialer [26]. Uten denne oppvarmingen vil brannspredningen stoppe opp eller gå betydelig senere. Oppvarmete materialer vil antenne lettere enn kalde når flammefronten når materialene. Oppvarmingen av materialene skjer som følge av: varmeledning, konveksjon og varmestråling. Brannspredning kan også skje ved at gnister fra et bygg som brenner svever over til et annet bygg og antenner dette.

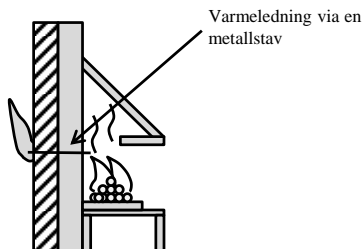
4.1.1 Brannspredning p.g.a. varmeledning

Brannspredning p.g.a. varmeledning skjer når et rør, metallstav, armeringsjern o.l. leder store mengder energi fra stedet hvor det brenner til andre steder.

Det er mange tilfeller hvor branner har spredd seg fra ett rom til et annet via metallobjekter. Et meget godt eksempel er det tilfellet hvor det plutselig begynte å brenne midt på en yttervegg i et rekkhus [65]. Brannvesenet ble tilkalt og slukket brannen. Etter at brannen var slukket, ble veggen revet og det ble funnet en metallstav som gikk fra baksiden av en peis og ut ytterveggen. Brannen oppsto i en periode hvor eieren av huset hadde fyrt kraftig i peisen over en lengre periode og dermed varmet opp metallstaven så mye at staven var varm nok til å antenne materialene i veggen [64].

Brannspredning via varmeledning fordrer at brennbare materialer er i direkte kontakt med gjenstander eller materialer som er så varme at brannen får mulighet til å spre seg til

¹Mer detaljert beskrivelse av varmetransportmetodene er beskrevet i kapitlene 5 - 9.



Figur 4.1: Brannspredning via varmeledning.

nye materialer. Dette er en form for brannspredning som er viktig tidlig i brannforløpet, og hvor selve brannen er liten av størrelse.

4.1.2 Brannspredning p.g.a. konveksjon

Brannspredning p.g.a. konveksjon² vil skje når flammer³ eller varm røyk transporterer så mye energi at brennbare materialer rundt brannen antennes.

Konveksjon er viktig i forbindelse med forvarming av brennbare materialer. Varm røyk vil forvarme materialene slik at flammene lettere vil antenne materialene når flammefronten kommer så langt (se figur 4.2). I figur 4.2 er det illustrert hvordan en flamme lettere vil forvarme et materiale når de varme gassene fra flammen beveger seg opp langs materialet. I noen tilfeller vil også røyken være så varm at den er istand til å varme opp materialene så mye at de spontanantenner, dvs. antennes uten at det er flammer eller andre tennkilder tilstede.

4.1.3 Brannspredning p.g.a. varmestråling

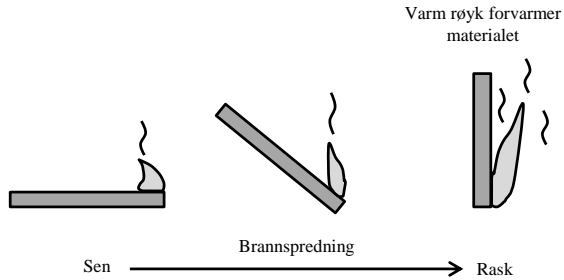
Brannspredning p.g.a. varmestråling vil skje dersom strålingen er så kraftig at den forårsaker en spontanantennelse⁴. Varmestrålingen kan komme fra både flammer og røyklaget som er produsert av brannen. Strålingen vil også varme opp materialer slik at disse lettere antennes når flammefronten når disse materialene. Varmestråling vil være den dominerende varmetransportformen ved en fullt utviklet rombrann.

I tabell 4.1 er det oppgitt noen verdier for varmestråling og hvordan strålingen kan påvirke mennesker og materialer.

²Konveksjon er varmetransport som følge av temperaturforskjeller mellom varme eller kalde gasser/væsker som strømmer over et objekt, og kan også bli omtalt som varmestromning.

³Flammer består av varme gasser og forbrenningsprodukt.

⁴Spontanantennelse er omtalt i kapittel 13.



Figur 4.2: Brannspredning via konveksjon.

Tabell 4.1: Virkning av varmestråling [26].

Varmeffluks (kW/m ²)	Observerte virkninger
0,67	Varmestråling fra solen om sommeren.
1	Maksimum tålegrense for varmestråling ved uendelig lang eksponering.
6,4	Smerter etter 8 sekunders eksponering på hud.
10,4	Smerter etter 3 sekunders eksponering på hud.
12,5	Gasser fra treverk kan antennes med en tennkilde etter lang tids eksponering for varmestråling.
16	Blemmer på hud etter 5 sekunders eksponering.
29	Treverk spontanantenner ved lang tids eksponering for varmestråling.
52	Fiberplater antenner etter 5 sekunders eksponering.

4.1.4 Brannspredning p.g.a. flyvebrann

Dersom en brann blir så kraftig at den involverer utsiden av bygningen, kan det bli produsert gnister som svever fra bygningen hvor det brenner og over til omliggende bygg og områder. De svevende gnistene blir ofte omtalt som flyvebranner. I en rekke større branner i USA som har involvert flere titalls eneboliger, har brannspredningen vært et resultat av at gnister fra en bolig- eller skogbrann har antent tretak på omliggende eneboliger.

Gnister fra branner kan også antenne gress eller skog, og dermed starte store gress- og skogbranner. Denne type branner kan være meget krevende å få under kontroll, samt at de kan utgjøre en betydelig risiko for hus og bygninger i det påvirkede området.

Kapittel 5

Varmeledning

Brannspredning via bygningsdeler skjer ofte som følge av varmeledning. Et vanlig hendelsesforløp er at varme arbeider som f. eks. sveising skjer på den ene siden av en vegg, og at energien transporteres gjennom materialer som leder varme godt. Varmen fra materialet kan under uheldige omstendigheter antenne materialer på den andre siden av vegg.

Varmeledning skjer ved at atomer og molekyler med forskjellig kinetisk energi påvirker hverandre. Denne påvirkningen er avhengig av aggregattilstanden til materialet (gass, væske eller fast stoff). I gass og væske er det kollisjoner mellom atomer og molekyler som overfører energi. For fast stoff er det frie elektroner som overfører energien [67].

5.1 Generell ligning

Det kan utledes ligninger for hvor mye energi som transporteres. Ligningene kan beskrive varmeledning både i en og flere retninger eller dimensjoner. Et system som endrer egenskaper i forhold til hvilken retning varmen strømmer, vil være et flerdimensjonalt varmeledningssystem. Videre kan varmeledningen endres med tid (transiente systemer) eller forbli konstant i forhold til tid (stasjonære system).

5.1.1 Fouriers lov om varmeledning

Stasjonær varmeledning tilsier at det ikke skjer endringer i materialets temperatur som funksjon av tid. Den konstante varmeledningen er uttrykt ved Fouriers lov, se ligning 5.1 og figur 5.1 [50].

$$\dot{q}_x = -k_x A_x \frac{dT}{dx} = -k_x A_x \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \quad (5.1)$$

hvor:

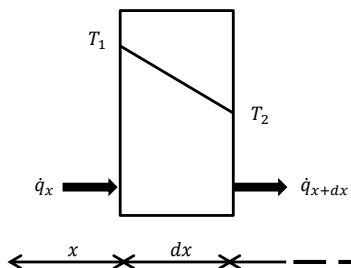
x er en indeks som henviser til varmeledning i x -retningen.

\dot{q}_x er varmeledningen i x -retningen (W).

A_x er arealet varmemengden strømmer igjennom (m^2). Arealet står normalt på x-aksen eller på bokplanet i figur 5.1.

k_x er materialets spesifikke varmeledningsevne i x-retningen ($\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$).

$\frac{dT}{dx}$ er temperaturgradienten i materialet, dvs. temperaturendringen i henhold til posisjon ($^\circ\text{C}/\text{m}$).



Figur 5.1: Varmeledning.

Ligning 5.1 beskriver at energitransporten (\dot{q}) er proporsjonal med temperaturgradienten ($\frac{dT}{dx}$) i materialet. Den spesifikke varmeledningsevne (k) er proporsjonalitetskonstanten som beskriver hvor lett varme strømmer gjennom et materiale¹. For faste materialer er det vanlig at gode varmeledere også er gode elektriske ledere. Høye verdier av varmeledningsevnen tilsier at et materiale leder varme godt, og lavere verdier tilsier mindre evne til energitransport. Noen eksempler er gitt i tabell 5.1.

Tabell 5.1: Spesifikk varmeledningsevne [50].

Materiale	Spesifikk varmeledningsevne ($\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$)
Luft	0,02624
Vann	0,604
Bly	35

¹Varmeledningsevnen er varmeefluksen (W/m^2) dividert med temperaturreduksjonen pr. lengde ($^\circ\text{C}/\text{m}$) [92]. Enheten til varmeledningsevnen blir da:

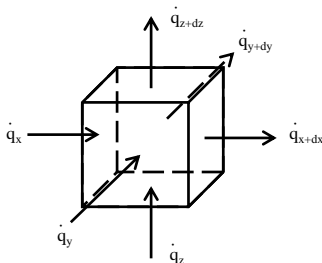
$$\frac{(\text{W}/\text{m}^2)}{(\text{^\circ C}/\text{m})} = \text{W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$$

Minustegnet i Fouriers lov er knyttet opp mot temperaturgradienten i systemet som vurderes. Når energi transporteres fra varme til kalde områder vil temperaturgradienten $\frac{dT}{dx}$ være negativ, se figur 5.1. I denne boken vil det bli brukt en konvensjon som tilsier at energi transporteres fra den venstre til den høyre siden av systemet som undersøkes. Dette betyr i praksis at den venstre siden av systemet har en høyere temperatur enn den høyre siden. Ved bruk av ligning 5.1 vil svaret bli positivt når energien strømmer fra venstre til høyre. I de tilfellene svaret blir negativt, betyr dette at energien transporteres i motsatt retning dvs. fra høyre til venstre. Energi-mengden som transporteres vil være lik i begge tilfellene.

5.1.2 Flerdimensjonal varmeledning

Varmeledningen i et materiale kan skje i flere retninger samtidig, se figur 5.2. Videre kan det lagres og produseres energi. En samlet ligning for energitransport, lagring og produksjon er gitt i ligning 5.2.

$$\dot{q}_{\text{inn}} + \dot{q}_{\text{produsert}} = \dot{q}_{\text{agret}} + \dot{q}_{\text{ut}} \quad (5.2)$$



Figur 5.2: Varmeledning i flere dimensjoner.

Ligning 5.1 kan utvides slik at den beskriver hvordan varmeledningen endrer seg i x -retningen, se ligningene 5.3 og 5.4. Energitransporten inn og ut av et element kan beskrives ved å utvide Fouriers ligning ved å bruke Taylor-serien på ligning 5.3². NB: \dot{q}_x''

²Taylor-serien ser ut som følger:

$$\dot{q}_{x+dx}'' = \dot{q}_x'' + \frac{\partial \dot{q}_x''}{\partial x} dx + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \dot{q}_x''}{\partial x^2} dx^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 \dot{q}_x''}{\partial x^3} dx^3 + \dots$$

Bidragene fra det tredje leddet og utover, er så små at de ses vekk fra.

er energitransporten i x-retningen pr. areal ($\dot{q}'' = \frac{\dot{q}}{A}$).

$$\dot{q}_{inn}'' = \dot{q}_x'' = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5.3)$$

$$\dot{q}_{ut}'' = \dot{q}_{x+dx}'' = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \quad (5.4)$$

Ved å trekke ligning 5.4 fra ligning 5.3 kan det settes opp et uttrykk for endringen i energitransporten. Ved å dividere på lengden endringen skjer over, kan det settes opp et uttrykk for endring i varmeledningen pr. lengde³.

$$\frac{\dot{q}_x'' - \dot{q}_{x+dx}''}{dx} = \frac{-k_x \frac{\partial T}{\partial x} - [-k_x \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial T}{\partial x}) dx]}{dx} \quad (5.5)$$

$$\left(\dot{q}''(x) \right)' = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (5.6)$$

\dot{q}''' er energitransport pr. areal. Den deriverte $(\dot{q}'')'$ er energitransporten pr. volum (\dot{q}''').

$$\dot{q}'''(x) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (5.7)$$

Varmeledningen i ligning 5.7 er angitt pr. volumenhet eller i kubikkmeter (m³) [50]. Tilsvarende ligninger kan formuleres for varmeledningen i y- og z-retningen.

$$\dot{q}'''(y) = \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (5.8)$$

$$\dot{q}'''(z) = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5.9)$$

Dersom det skal utledes en generell ligning for elementet i figur 5.2, må ligningen også inneholde et uttrykk for varmen som er lagret i elementet. Energimengden som lagres (\dot{q}'''), er avhengig av materialets tetthet, spesifikk varmekapasitet og temperatur. Ligning 5.10 viser varmemengden i et element [81].

$$\dot{q}''' = \int_{T_1}^{T_2} \rho c_P dT \quad (5.10)$$

hvor:

\dot{q}''' er lagret energi (J/m³).

ρ er tetthet (kg/m³).

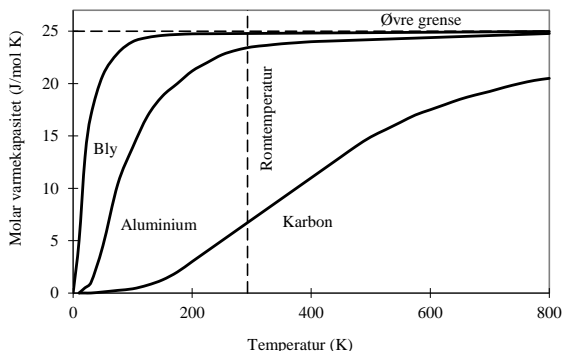
³ Dette er den deriverte av varmeledningen og ligningen nedenfor benyttes for å gå fra ligning 5.5 til ligning 5.7.

$$(\dot{q}')' = \lim_{dx \rightarrow 0} \frac{d\dot{q}}{dx}$$

c_P er spesifikk varmekapasitet ($J/(kg \cdot ^\circ C)$).

dT er temperaturoendringen i elementet ($^\circ C$).

Spesifikk varmekapasitet er en variabel som er temperaturavhengig. Ved null grader Kelvin er varmekapasiteten lik null. Når temperaturen stiger, øker også varmekapasiteten. Ved høyere temperaturer vil varmekapasiteten bli konstant. Temperaturen hvor varmekapasiteten går fra å være temperaturavhengig til konstant, er omtalt som Debye-temperaturen [81]. I figur 5.3 er det skissert hvordan varmekapasiteten til noen materialer endres med temperatur [43]. På grunn av temperaturavhengigheten til den spesifikke varmekapasiteten, er det vanskelig å beregne den totale energimengden til et materiale. For å unngå dette problemet, blir det sett på hvordan lagret energimengde endres over tid. Ved kun å se på endringene i energimengden, kan en se bort fra området hvor varmekapasiteten er temperaturavhengig og anta at varmekapasiteten er konstant.



Figur 5.3: Debye-temperaturen.

Endring i energimengden som er lagret som funksjon av tid ($\dot{q}'''_{\text{lagret}}$) er satt opp i ligning 5.11.

$$\dot{q}''' = \rho c_P \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (5.11)$$

Ved å kombinere ligningene 5.7, 5.8, 5.9 og 5.11, samt inkludere et ledd for energiproduksjon (\dot{q}'''_{prod}) kan det utledes en ligning for systemet beskrevet i figur 5.2, se ligning 5.12.

$$\rho c_P \frac{\delta T}{\delta \tau} = \frac{\delta}{\delta x} (k_x \frac{\delta T}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y} (k_y \frac{\delta T}{\delta y}) + \frac{\delta}{\delta z} (k_z \frac{\delta T}{\delta z}) + \dot{q}'''_{\text{prod}} \quad (5.12)$$

Ligning 5.12 beskriver et tre-dimensjonalt system (3D) med temperaturoendringer som funksjon av tid. Dette blir også omtalt som et transient system. Transiente system blir presentert nærmere i kapittel 9 og stasjonære system i kapittel 5.2.

5.2 Stasjonær varmeledning

I de tilfeller hvor temperaturen endres som følge av posisjon, men ikke som følge av tid, blir systemet omtalt som stasjonært. Dette betyr at den lagrete energimengde forblir konstant.

$$\rho c_p \frac{\delta T}{\delta \tau} = 0$$

De resterende leddene i ligning 5.12 beskriver endringene i temperaturen i henhold til posisjonen i et flerdimensjonalt element.

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(k_x \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k_y \frac{dT}{dy} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(k_z \frac{dT}{dz} \right) + \dot{q}'_{\text{prod}} = 0 \quad (5.13)$$

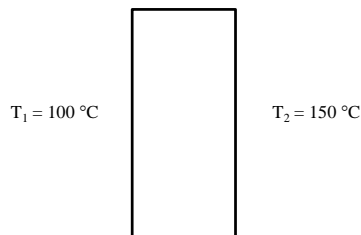
I de tilfeller varmetransporten kun skjer i en retning, blir systemet kalt endimensjonalt. Leddene i ligning 5.13 med henvisning til y - og z -retningene vil være lik null og falle bort i ligningen. Om det også antas at det ikke produseres energi i systemet ($\dot{q}'_{\text{prod}} = 0$), kan ligningen forenkles til Fouriers lov gitt i ligningene 5.14 og 5.15.

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(k_x \frac{\delta T}{\delta x} \right) = 0 \quad (5.14)$$

$$\dot{q}'' = k_x \frac{\delta T}{\delta x} \quad (5.15)$$

Eksempel 5.1

Sidene til kobberstykket vist i figur 5.4, er varmet opp til 100 °C og 150 °C på henholdsvis venstre og høyre side. Hvor mye energi blir transportert pr. areal og i hvilken retning? Anta at kobberstykket er 1 cm tykt og har en varmeledningsevne på 385 W/(m·°C).



Figur 5.4: Oppvarmet kobberstykke.

Løsning:

Fra Fouriers lov om varmeledning:

$$\begin{aligned} \dot{q}_x'' &= -k \cdot \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \\ &= -385 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot \frac{150 \text{ }^\circ\text{C} - 100 \text{ }^\circ\text{C}}{0,01 \text{ m}} \\ &= -1\,925\,000 \text{ W}/\text{m}^2 \end{aligned}$$

Det transporteres energi som tilsvarer $1\,925\,000 \text{ W}/\text{m}^2$, og energien ledes fra høyre til venstre side.



Eksempel 5.2

Den ene siden til et stykke stål er varmet opp til $150 \text{ }^\circ\text{C}$ og varmefluksen gjennom stålet er $250 \text{ kW}/\text{m}^2$. Hva er temperaturen på den kalde siden av stålstykket? Anta at stålstykket er 2 cm tykt og har en varmeledningsevne på $45 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$.

Løsning:

Ved å integrere Fouriers ligning, kan følgende ligning bli utledet:

$$\dot{q}_x'' = \frac{\dot{q}_x}{A} = -k \cdot \frac{T_2 - T_1}{\Delta x}$$

I denne oppgaven er det temperaturen på den kalde siden som skal bestemmes, dvs. T_2 . Fra Fouriers lov:

$$\begin{aligned} \dot{q}_x'' &= -k \cdot \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \\ T_2 &= \frac{\dot{q}_x'' \cdot \Delta x}{-k} + T_1 \\ T_2 &= \frac{250 \text{ kW}/\text{m}^2 \cdot 0,02 \text{ m}}{-0,045 \text{ kW}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})} + 150 \text{ }^\circ\text{C} \\ &= 38,9 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Temperaturen på den kalde siden blir $38,9 \text{ }^\circ\text{C}$.



5.3 Temperaturavhengig varmeledningsevne

Materialenes varmeledningsevne (k) endres som en funksjon av temperatur. I hvilken grad varmeledningen endres er avhengig av hvilken aggregattilstand materialet befinner seg i. Gasser og væsker vil ha atomer og molekyler som kan bevege seg relativt fritt og overføre varme ved kollisjoner. I faste stoffer er det elektroner som forflytter energi [67].

Varmeledningsevnen til bygningsmaterialer vil også bli påvirket av temperatur. Stål er et eksempel på hvordan varmeledningsevnen endres ved temperaturrendringer. Stål blir vanligvis oppgitt med et varmeledningstall på ca. $45 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Dette varmeledningstallet tar ikke hensyn til endringer som skjer i materialet p.g.a. temperaturvariasjoner. Undersøkelser viser at stålets varmeledningsevne endrer seg som følge av temperaturrendringer [62]. For vanlig bygningsstål gjelder følgende forhold:

$$\begin{aligned} k &= -0,022 \cdot T + 48 && \text{For } 0^\circ\text{C} \leq T \leq 900^\circ\text{C} \\ k &= 28,2 && \text{For } T > 900^\circ\text{C} \end{aligned}$$

hvor:

k er varmeledningsevne ($\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$)

T er temperaturen i stålet ($^\circ\text{C}$)

I de tilfeller materialer blir vurdert innenfor et lite temperaturintervall, er det tilfredsstillende å anta at varmeledningsevnen er konstant. Det vil derimot oppstå unøyaktigheter i de tilfeller der det er større temperaturvariasjoner og flere materialer som har egenskaper som endres forskjellig i forhold til temperatur. For å ivareta denne type problemstilling, er det ofte tatt i bruk numeriske beregningsmetoder hvor materialegenskaper kan endres i henhold til temperatur.

Eksempel 5.3

Finn varmeledningen for stål ved 300°C .

Løsning:

For å finne varmeledningen til stål brukes følgende ligning:

$$k = -0,022 \cdot T + 48 \quad \text{For } 0^\circ\text{C} \leq T \leq 900^\circ\text{C}$$

Når T settes lik 300°C , blir varmeledningsevnen k lik

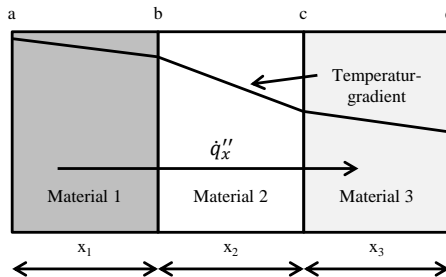
$$\begin{aligned} k &= -0,022 \cdot 300^\circ\text{C} + 48 \\ &= 41,4 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

5.4 Komplekse konstruksjoner

I de fleste tilfeller vil det bli benyttet konstruksjoner som består av en rekke forskjellige materialer. I en vanlig vegg vil flere typer materialer danne lag i veggene. Ved beregning av en-dimensjonal stasjonær varmeledning⁴, vil materialenes orientering og posisjon avgjøre hvordan beregningen utføres.

5.4.1 Material i serie

Materialene i en vegg står i mange tilfeller etter hverandre i forskjellige lag. Energi som transporteres gjennom veggene, må da forflyttes gjennom ett og ett lag om gangen. Denne form for orientering av lag blir i varmelære beskrevet som at materialene er i serie. Energimengden som transporteres i de forskjellige lagene er den samme når varmeledningen er stasjonær. Varmetransporten i de forskjellige lagene er dermed den samme [50]. I figur 5.5 er det skissert en vegg bestående av tre lag. Varmegjennomgangen i de enkelte lag er beskrevet i ligning 5.16 [50]. T_a , T_b , osv. er temperaturene ved overgangene mellom lagene henviset til a, b, osv. i figur 5.5.



Figur 5.5: Varmeledning gjennom flere lag.

$$\dot{q} = -k_1 A \frac{T_b - T_a}{\Delta x_1} = -k_2 A \frac{T_c - T_b}{\Delta x_2} = -k_3 A \frac{T_d - T_c}{\Delta x_3} \quad (5.16)$$

Ved å løse uttrykkene i ligning 5.16 samtidig, kan varmetransporten gjennom konstruksjonen beskrives som et forhold mellom temperaturforskjellen på ytterveggene av

⁴Transiente systemer er beskrevet i kapittel 9. For mer teori om fler-dimensjonal varmetransport, henvises det til annen litteratur om varmetransport.

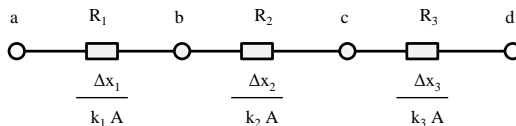
konstruksjonen og motstanden mot varmetransporten. Utledningen er vist nedenfor.

$$\begin{aligned} \dot{q} &= -k_1 A \frac{T_b - T_a}{\Delta x_1} \\ T_b &= \frac{-\dot{q}}{k_1 A} \cdot \Delta x_1 + T_a \\ \dot{q} &= -k_2 A \frac{T_c - T_b}{\Delta x_2} \\ T_c &= \frac{-\dot{q}}{k_2 A} \cdot \Delta x_2 + T_b \\ T_c &= \frac{-\dot{q}}{k_2 A} \cdot \Delta x_2 + \frac{-\dot{q}}{k_1 A} \cdot \Delta x_1 + T_a \\ \dot{q} &= -k_3 A \frac{T_d - T_c}{\Delta x_3} \\ T_d &= \frac{-\dot{q}}{k_3 A} \cdot \Delta x_3 + T_c \\ T_d &= \frac{-\dot{q}}{k_3 A} \cdot \Delta x_3 + \frac{-\dot{q}}{k_2 A} \cdot \Delta x_2 + \frac{-\dot{q}}{k_1 A} \cdot \Delta x_1 + T_a \end{aligned} \quad (5.17)$$

Den utledede ligningen for systemet som er vist i figur 5.5, er gitt i ligning 5.18.

$$\dot{q} = \frac{T_a - T_d}{\frac{\Delta x_1}{k_1 A} + \frac{\Delta x_2}{k_2 A} + \frac{\Delta x_3}{k_3 A}} \quad (5.18)$$

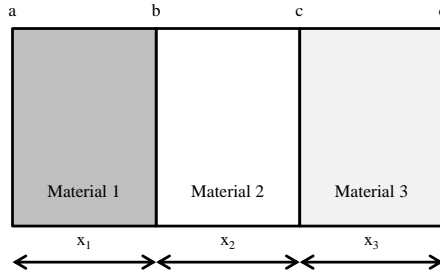
Forholdet $\frac{\Delta x}{kA}$ blir kalt materialets termiske motstand [50]. Dette henspiller på likheten mellom varmetransport-ligningen og Ohms lov. Som en følge av likhetene mellom varme og elektrisitet, blir ofte varmetransportsystemer skissert opp på samme måte som elektriske systemer. I figur 5.6 er det skissert opp et elektriskanalogs system som tilsvarer veggens i figur 5.5. Elektriskanalogs systemer er meget illustrative for bruk på mer kompliserte konstruksjoner.



Figur 5.6: Elektriskanalogs system.

Eksempel 5.4

Bestem varmeffluksen i systemet skissert i figur 5.7, når materialverdiene er gitt i tabell 5.2. Bestem også temperaturen mellom lag 2 og 3. Temperaturene på henholdsvis høyre- og venstreside av vegg, er 50 og 500 °C.



Figur 5.7: System i serie.

Tabell 5.2: Materialegenskaper.

Material	Type	k W/(m·°C)	Δx m
1	Isolasjon	0,1	0,15
2	Stål	35,0	0,1
3	Isolasjon	0,1	0,15

Løsning:

Benytt ligning 5.18 for å beregne varmeffluksen.

$$\frac{\dot{q}}{A} = \frac{T_a - T_d}{\frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{\Delta x_3}{k_3}}$$

$$\dot{q}'' = \frac{500 \text{ °C} - 50 \text{ °C}}{\frac{0,15 \text{ m}}{0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{°C})} + \frac{0,1 \text{ m}}{35 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{°C})} + \frac{0,15 \text{ m}}{0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{°C})}}$$

$$= 149,9 \text{ W}/\text{m}^2$$

Varmefluksen i systemet er 149,9 W/m².

Temperaturen T_c kan bestemmes fra ligning 5.16.

$$\dot{q}'' = -k_3 \frac{T_d - T_c}{\Delta x_3}$$

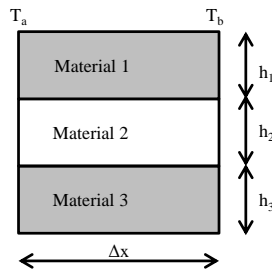
Både varmeffluksen og temperaturen T_d er kjent, og ved å omforme ligningen kan T_c beregnes:

$$\begin{aligned} T_c &= \frac{-\dot{q}'' \cdot \Delta x_3}{-k_3} + T_d \\ &= \frac{-149,9 \text{ W/m}^2 \cdot 0,15 \text{ m}}{-0,1 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}} + 50 \text{ °C} \\ &= 274,9 \text{ °C} \end{aligned}$$

Temperaturen mellom lag 2 og 3 er 275 °C.

5.4.2 Parallele materialer

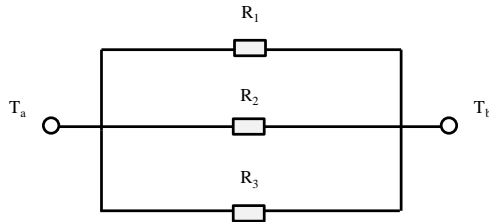
I de tilfeller energi transporteres i flere materialer samtidig, beskrives konstruksjonen som om materialene ligger parallelt. Dette medfører at energi transporteres fra ett sted til et annet via flere traséer. Figur 5.8 illustrerer et system av parallelle materialer. Parallele systemer kan på lik linje med systemer i serie skisseres som et elektriskanalogt system. Systemet som er illustrert i figur 5.8 er vist som et analogt system i figur 5.9.



Figur 5.8: Parallell varmeledning.

Dersom energien transporteres gjennom forskjellige materialer, vil energi-mengden som transporteres i det enkelte materialet variere i henhold til den termiske motstanden til materialet [50]. Ved å ta utgangspunkt i figur 5.8 vil den totale varmetransporten i konstruksjonen være:

$$\dot{q} = \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 \quad (5.19)$$



Figur 5.9: Analogt parallelt system.

Energitransporten i det enkelte materiale kan beskrives med Fouriers ligning.

$$\dot{q}_1 = -kA_1 \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (5.20)$$

Ved å summere opp den totale varmegjennomgangen, kan følgende uttrykk utledes for hele systemet:

$$\dot{q} = -k_1 A_1 \frac{\Delta T}{\Delta x} - k_2 A_2 \frac{\Delta T}{\Delta x} - k_3 A_3 \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (5.21)$$

$$\dot{q} = -\frac{\Delta T}{R} \quad (5.22)$$

hvor:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (5.23)$$

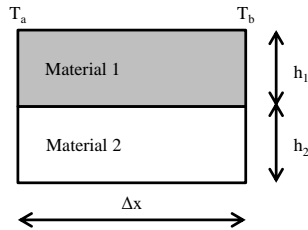
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{\Delta x_1}{k_1 A_1}} + \frac{1}{\frac{\Delta x_2}{k_2 A_2}} + \frac{1}{\frac{\Delta x_3}{k_3 A_3}} \quad (5.24)$$

$$R = \frac{1}{\frac{1}{\frac{\Delta x_1}{k_1 A_1}} + \frac{1}{\frac{\Delta x_2}{k_2 A_2}} + \frac{1}{\frac{\Delta x_3}{k_3 A_3}}} \quad (5.25)$$

Ligningen 5.25 kan utvides i henhold til antall materialer som ligger parallelt til energiens transportretning.

Eksempel 5.5

Beregn varmegjennomgangen i systemet vist i figur 5.10. Materialverdiene er gitt i tabell 5.3, og temperatuene på henholdsvis høyre- og venstreside er 20 °C og 200 °C.



Figur 5.10: Parallell varmeledning i 2-lags konstruksjon.

Tabell 5.3: Materialegenskaper.

Material	Type	k W/(m·°C)	h m	b m	Δx m
1	Lett betong	1,0	0,1	2,0	0,5
2	Stål	45,0	0,01	2,0	0,5

Løsning:

Ved å ta utgangspunkt i ligning 5.21, kan følgende uttrykk settes opp for å finne varmegjennomgangen gjennom konstruksjonen vist i figuren.

$$\dot{q} = -k_1 A_1 \frac{\Delta T}{\Delta x} - k_2 A_2 \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$\dot{q} = -\frac{\Delta T}{R}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Varmemotstandene for de enkelte materialene er beregnet nedenfor.

$$R_1 = \frac{\Delta x}{k_1 A_1} = \frac{0,5 \text{ m}}{1 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \cdot (0,1 \text{ m} \cdot 2 \text{ m})} = 2,5 \frac{\text{°C}}{\text{W}}$$

$$R_2 = \frac{\Delta x}{k_2 A_2} = \frac{0,5 \text{ m}}{45 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \cdot (0,01 \text{ m} \cdot 2 \text{ m})} = 0,556 \frac{\text{°C}}{\text{W}}$$

Videre kan den totale varmemotstanden beregnes:

$$\begin{aligned}\frac{1}{R} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \\ \frac{1}{R} &= \frac{1}{2,5 \frac{\text{°C}}{\text{W}}} + \frac{1}{0,556 \frac{\text{°C}}{\text{W}}} \\ R &= 0,455 \frac{\text{°C}}{\text{W}}\end{aligned}$$

Tilslutt kan varmegjennomgangen beregnes:

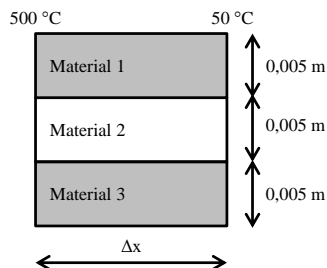
$$\begin{aligned}\dot{q} &= -\frac{T_B - T_A}{R} \\ &= -\frac{(20 - 200) \text{°C}}{0,455 \frac{\text{°C}}{\text{W}}} \\ &= 396 \text{ W}\end{aligned}$$

Varmegjennomgangen i konstruksjonen blir 396 W.



Eksempel 5.6

Beregn den totale varmegjennomgangen pr. breddeenheter i systemet vist i figur 5.11, med materialverdier i tabell 5.4. Beregn også varmegjennomgangen for material 2 i det samme systemet når bredden settes lik 2 meter. (NB: Bredden står 90° på planet vist i figur 5.11 eller på siden i boken.)



Figur 5.11: Parallell varmeledning i 3-lags konstruksjon.

Tabell 5.4: Materialegenskaper.

Material	Type	k	h	Δx
		W/(m \cdot °C)	m	m
1	Isolasjonsmateriale	0,1	0,005	0,05
2	Stål	35,0	0,005	0,05
3	Isolasjonsmateriale	0,1	0,005	0,05

Løsning:

Ved å ta utgangspunkt i ligning 5.21, kan følgende uttrykk settes opp for å finne varmegjennomgangen gjennom konstruksjonen vist i figur 5.11:

$$\dot{q} = -k_1 A_1 \frac{\Delta T}{\Delta x} - k_2 A_2 \frac{\Delta T}{\Delta x} - k_3 A_3 \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$\dot{q} = -\frac{\Delta T}{R}$$

Varmemotstanden kan skrives litt om for å ta høyde for bredden:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R} = b \cdot \left(\frac{1}{R_1^*} + \frac{1}{R_2^*} + \frac{1}{R_3^*} \right)$$

Varmemotstanden for de enkelte materialene er som følger:

$$R_1^* = \frac{\Delta x}{k_1 h_1} = \frac{0,05 \text{ m}}{0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{°C}) \cdot 0,005 \text{ m}} = 100 \text{ °C} \cdot \text{m}/\text{W}$$

$$R_2^* = \frac{\Delta x}{k_2 h_2} = \frac{0,05 \text{ m}}{35 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{°C}) \cdot 0,005 \text{ m}} = 0,286 \text{ °C} \cdot \text{m}/\text{W}$$

$$R_3^* = \frac{\Delta x}{k_3 h_3} = \frac{0,05 \text{ m}}{0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{°C}) \cdot 0,005 \text{ m}} = 100 \text{ °C} \cdot \text{m}/\text{W}$$

Den totale varmemotstanden blir da:

$$\frac{1}{R} = b \cdot \left(\frac{1}{100 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{m}/\text{W}} + \frac{1}{0,286 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{m}/\text{W}} + \frac{1}{100 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{m}/\text{W}} \right)$$

$$\frac{1}{R} = b \cdot 3,52 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\dot{q} = \Delta T \cdot b \cdot 3,52 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\frac{\dot{q}}{b} = (500 \text{ }^\circ\text{C} - 50 \text{ }^\circ\text{C}) \cdot 3,52 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\frac{\dot{q}}{b} = 1582 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Varmefluksen pr. breddeenheter er 1582 W/m.

For å beregne varmegjennomgangen i material 2, må R_2^* divideres med bredden, for å finne R_2 .

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{R_2^*}{b} \\ &= \frac{0,286 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{m}/\text{W}}{2 \text{ m}} \\ &= 0,143 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W} \end{aligned}$$

Når den termiske motstanden er funnet, kan \dot{q}_2 beregnes:

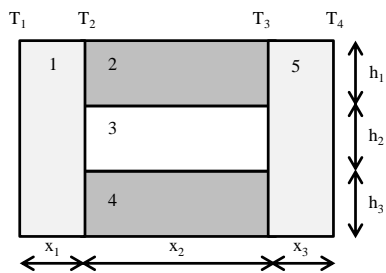
$$\begin{aligned} \dot{q}_2 &= \frac{\Delta T}{R_2} \\ &= \frac{500 \text{ }^\circ\text{C} - 50 \text{ }^\circ\text{C}}{0,143 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}} \\ &= 3147 \text{ W} \end{aligned}$$

Varmegjennomgangen i material 2 vil være 3147 W.

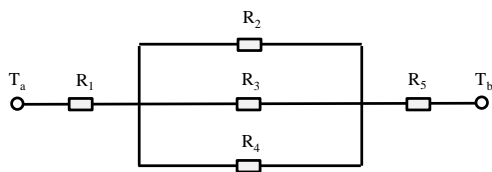
5.4.3 Sammensatte konstruksjoner

I de fleste konstruksjoner vil det være kombinasjoner av lag som er i serie og parallele. Dette medfører at metodene for materialer i serie og materialer i parallell må kombineres for å kunne beskrive konstruksjonene⁵. I figur 5.12 er det vist en enkel konstruksjon, som illustrerer en sammensatt konstruksjon. For sammensatte konstruksjoner er det fordelaktig å tegne opp analoge system, se figur 5.13. Dette vil gjøre det lettere å forstå hvordan energien blir transportert i systemet, samt lette beregningene av varmetransporten.

⁵Her er det viktig å huske på antagelsen om 1D-varmetransport. Skal det vurderes varmetransport i flere dimensjoner, må det brukes mer avanserte metoder.



Figur 5.12: Sammensatt konstruksjon.



Figur 5.13: Analogt system for sammensatt konstruksjon.

For å kunne beregne varmegjennomgangen i en sammensatt konstruksjon, må en vanligvis først beregne varmemotstanden for de parallelle elementer. Når de parallelle elementene er beregnet, kan resten av systemet beregnes som elementer i serie.

Eksempel 5.7

Beregn den 1-dimensjonale stasjonære varmegjennomgangen for konstruksjonen i figur 5.12, når materialverdier o.l. er gitt i tabell 5.5. Temperatuere på henholdsvis høyre- og venstresiden er 50 og 500 °Celsius.

Tabell 5.5: Materialelegenskaper.

Material	Type	k W/(m·°C)	h m	b m	Δx m
1	Isolasjon	0,1	0,225	1	0,05
2	Stål	35,0	0,075	1	0,3
3	Isolasjon	0,1	0,075	1	0,3
4	Stål	35,0	0,075	1	0,3
5	Isolasjon	0,1	0,225	1	0,05

Løsning:

Det er fordelaktig å begynne med å skissere opp det analoge elektriske systemet for å få en oversikt over varmetransporten. Se figur 5.13.

Varmemotstanden i de enkelte materialene er:

$$R_1 = \frac{\Delta x_1}{k_1 A_1} = \frac{0,05 \text{ m}}{0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C}) \cdot 0,225 \text{ m}^2} = 2,22 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_2 = \frac{\Delta x_2}{k_2 A_2} = \frac{0,3 \text{ m}}{35 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C}) \cdot 0,075 \text{ m}^2} = 0,11 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_3 = \frac{\Delta x_3}{k_3 A_3} = \frac{0,3 \text{ m}}{0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C}) \cdot 0,075 \text{ m}^2} = 40 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_4 = R_2 = 0,11 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_5 = R_1 = 2,22 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

Fra figur 5.13 går det frem at R_2 , R_3 og R_4 utgjør et parallelt system. For å forenkle utregningene, blir dette parallelle systemet (R_x) beregnet først.

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$$

Ved å bruke R-verdiene som er beregnet ovenfor, vil R_x bli:

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{0,11 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}} + \frac{1}{40 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}} + \frac{1}{0,11 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}}$$

$$R_x = 0,05 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

Når den parallelle delen av varmetransportssystemet er ivarettatt i R_x , er selve systemet redusert til tre elementer i serie. Varmegjennomgangen blir da:

$$\dot{q} = -\frac{\Delta T}{(R_1 + R_x + R_5)}$$

$$= \frac{500 \text{ } ^\circ\text{C} - 50 \text{ } ^\circ\text{C}}{2,22 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} + 0,05 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} + 2,22 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}}$$

$$\dot{q} = 100,2 \text{ W}$$

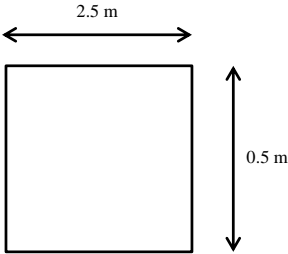
Den totale varmegjennomgangen i dette systemet er ca. 100 W.

Eksempel 5.8

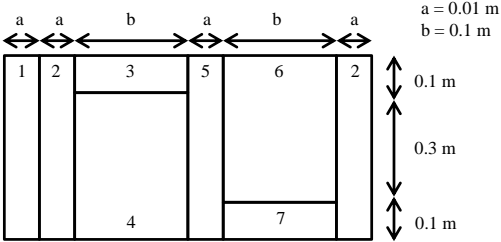
Beregn den 1-dimensjonale stasjonære varmegjennomgangen i en konstruksjon, bestående av 8 elementer som vist i figur 5.14. Temperaturen på henholdsvis venstre og høyreside av konstruksjonen er 820 og 50 °C. Materialelegenskaper og dimensjoner er gitt i tabell 5.6.

Tabell 5.6: Materialelegenskaper.

Material	Type	k W/(m·°C)	C_p J/kg °C	h m	b m	Δx m
1	Stål	35,0	460	0,5	2,5	0,01
2	Gips	0,50	1000	0,5	2,5	0,01
3	Stål	35,0	460	0,1	2,5	0,10
4	Isolasjon	0,05	700	0,4	2,5	0,10
5	Gips	0,50	1000	0,5	2,5	0,01
6	Isolasjon	0,05	700	0,4	2,5	0,10
7	Stål	35,0	460	0,1	2,5	0,10
8	Stål	35,0	460	0,5	2,5	0,01



(a) Oppriss



(b) Vertikalt snitt

Figur 5.14: Åtte materialer i en sammensatt konstruksjon.

Løsning:

1. Finn enkelte varmemotstandene: R_{1-8}

Bredden på alle materialene er 2,5 meter.

$$R_1 = \frac{\Delta x_1}{k_1 A_1} = \frac{0,01 \text{ m}}{35 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C}) \cdot (0,5 \cdot 2,5) \text{ m}^2} = 2,3 \cdot 10^{-4} \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_2 = \frac{\Delta x_2}{k_2 A_2} = \frac{0,01 \text{ m}}{0,5 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C}) \cdot (0,5 \cdot 2,5) \text{ m}^2} = 0,016 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_3 = \frac{\Delta x_3}{k_3 A_3} = \frac{0,10 \text{ m}}{35 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C}) \cdot (0,1 \cdot 2,5) \text{ m}^2} = 0,011 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_4 = \frac{\Delta x_4}{k_4 A_4} = \frac{0,10 \text{ m}}{0,05 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C}) \cdot (0,4 \cdot 2,5) \text{ m}^2} = 2,0 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_5 = \frac{\Delta x_5}{k_5 A_5} = \frac{0,01 \text{ m}}{0,5 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C}) \cdot (0,5 \cdot 2,5) \text{ m}^2} = 0,016 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_6 = \frac{\Delta x_6}{k_6 A_6} = \frac{0,10 \text{ m}}{0,05 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C}) \cdot (0,4 \cdot 2,5) \text{ m}^2} = 2,0 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_7 = \frac{\Delta x_7}{k_7 A_7} = \frac{0,1 \text{ m}}{35 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C}) \cdot (0,1 \cdot 2,5) \text{ m}^2} = 0,011 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_8 = \frac{\Delta x_8}{k_8 A_8} = \frac{0,01 \text{ m}}{35 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C}) \cdot (0,5 \cdot 2,5) \text{ m}^2} = 2,3 \cdot 10^{-4} \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

2. Finn den totale varmemotstanden: R

$$R = R_1 + R_2 + R_x + R_5 + R_y + R_8$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_x} &= \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \\ &= \left[\frac{1}{0,011} + \frac{1}{2} \right] \frac{\text{W}}{^\circ\text{C}} \\ &= 91,4 \frac{\text{W}}{^\circ\text{C}} \\ R_x &= 0,0109 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \end{aligned}$$

R_x og R_y er like p.g.a. samme materialer og størrelser

$$R_x = R_y = 0,0109 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$\begin{aligned} R &= \left[2,3 \cdot 10^{-4} + 0,016 + 0,0109 + 0,016 \right. \\ &\quad \left. + 0,0109 + 2,3 \cdot 10^{-4} \right] \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \\ &= 0,0543 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \end{aligned}$$

3. Varmegjennomgangen i konstruksjonen

$$\begin{aligned}\dot{q} &= -\frac{T_2 - T_1}{R} \\ &= -\frac{50 \text{ }^\circ\text{C} - 820 \text{ }^\circ\text{C}}{0,0543 \frac{\text{ }^\circ\text{C}}{\text{W}}} \\ &= 14\,180 \text{ W}\end{aligned}$$

Varmegjennomgangen for et element er 14,1 kW og varmen transporteres fra venstre til høyre. For å finne den totale varmegjennomgangen for veggen, må varmegjennomgangen for et element multipliseres med fem. D.v.s at varmegjennomgangen for veggen er 70,9 kW.

Kapittel 6

Konveksjon

Konveksjon eller varmestrømning oppstår når en væske eller gass¹ strømmer over et fast materiale hvor temperatursforskjellen mellom væsken og det faste materialet medfører transport av energi.

Konveksjon er en av tre måter energi transporteres mellom legemer. I den grad det er viktig, blir det hevdet at konveksjon ikke er en virkelig transportmetode [3]. Dette har sammenheng med at selve energioverføringen mellom det faste materialet og væsken skjer som følge av varmeledning via et lag med væske-molekyler som ligger i ro ved overflaten til den aktuelle flaten [3]. Den videre energitransporten fra grensesjiktet skjer via diffusjon eller som følge av turbulens. Dette er en viktig observasjon, men fordi konveksjon er så viktig i forbindelse med brann bør konveksjon ses på som en av tre transportmetoder.

6.1 Newtons lov for kjøling

I figur 6.1 er det illustrert hvordan energi transporteres mellom en væske og en flate. Som det fremgår av figuren er hastigheten til væsken (u) lik null i overgangen mellom flaten og væsken. Hastighetsprofilen til væsken er en funksjon av avstanden til flaten [3, 60]. Selve energioverføringen mellom væsken og flaten skjer som følge av varmeledning. Konveksjon er derfor en kombinasjon av varmeledning og bevegelse av væskepartiklene. Dette betyr at hastighet, viskositet, spesifikk varmekapasitet osv. vil påvirke varmetransporten til systemet. I tillegg kommer den geometriske utformingen av flaten væsken strømmer over [40]. Energimengden som transporteres mellom væske og flate er beskrevet i Newtons lov for kjøling, som er gitt i ligning 6.1 [92].

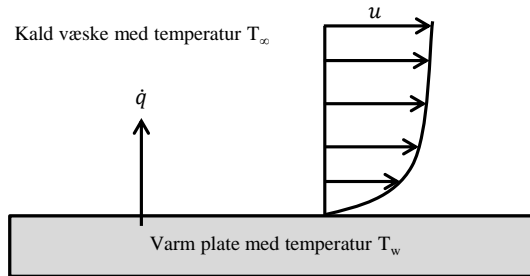
$$\dot{q}_c = hA(T_w - T_\infty) \tag{6.1}$$

hvor:

\dot{q}_c er den konvektive varmeoverføringen (W)

h er konveksjonsfaktoren (W/(m²·°C))

¹Videre i boken vil kun begrepet væske bli brukt, men begrepet vil da beskrive både væske og gass dersom ikke annet er nærmere spesifisert. I en del annen litteratur er begrepet fluid benyttet.



Figur 6.1: Varmetransport ved konveksjon.

A er arealet hvor det er kontakt mellom væske og flate (m^2)

T_w er temperaturen til flaten ($^{\circ}\text{C}$)

T_∞ er temperaturen til væsken ($^{\circ}\text{C}$)

I ligning 6.1 blir det antatt at varmen transporteres fra en varm overflate og til en kald væske. Dersom varmen transporteres i motsatt retning, dvs. fra en varm væske til en kald flate, blir svaret ved å bruke ligning 6.1 negativt. Den negative størrelsen indikerer kun at varmetransporten skjer i den motsatte retningen av det definerte systemet.

Ved konveksjon blir det gjort et skille mellom naturlig og tvungen konveksjon. Når væsken blir satt i bevegelse av utenforliggende faktorer som f. eks. vifter, kalles varmetransporten for tvungen konveksjon. Naturlig konveksjon² vil oppstå når væsken beveger seg som følge av temperatur- og tetthetsforskjeller. Tvungen eller naturlig bevegelse av væsken vil gi seg utslag i forskjellige hastighetsprofiler. Dette medfører forskjeller i varmeoverføringsratene, som igjen gjenspeiles i konveksjonsfaktoren (h). I tabell 6.1 er det gitt noen eksempler på hvordan konveksjonsfaktoren varierer med hensyn til væske-type, geometrisk utforming, naturlig eller tvungen konveksjon.

Det er viktig å forstå at konveksjonsfaktorer (h) er et empirisk tall³, som må utledes via ligninger som er funnet gjennom eksperimentelt arbeid. Ligningene for konveksjonsfaktorene er delt inn i grupper for naturlig og tvungen konveksjon. Videre er ligningene inndelt i henhold til om strømmingen er laminær eller turbulent.

²Energitransporten fra en brann via røyk er et eksempel på naturlig konveksjon.

³Et empirisk tall er funnet via eksperimentelle data, og ikke utledet fra fundamentale størrelser innen fysikk og matematikk.

Tabell 6.1: Eksempler på størrelser for konveksjonsfaktor [50].

Konfigurasjon	h $(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C})$
Naturlig konveksjon	
For vertikal plate 0,3 m høy i luft	4,5
For horisontal sylinder 5 cm i diameter i luft	6,5
For horisontal sylinder 2 cm i diameter i vann	890
Tvungen konveksjon	
Luft strømmer over en $0,2 \cdot 0,2$ m plate med 2 m/s	12
Luft strømmer over en $0,7 \cdot 0,7$ m plate med 35 m/s	75
Vann strømmer i et rør med diameter 2,5 cm med en rate på 0,5 kg/s	3500

Eksempel 6.1

Kaldt vann strømmer over en plate med areal 2 m^2 . Hvor mye varme blir overført når temperaturen på vannet og platen er henholdsvis 1°C og 80°C ? Anta en konveksjonsfaktor på $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Løsning:

Ta utgangspunkt i ligning 6.1:

$$\begin{aligned} \dot{q}_c &= hA(T_w - T_\infty) \\ &= 1000 \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})} \cdot 2 \text{ m}^2 \cdot (80^\circ\text{C} - 1^\circ\text{C}) \\ &= 158\,000 \text{ W} = 158 \text{ kW} \end{aligned}$$

Det blir transportert 158 kW med varme fra platen til vannet.

Eksempel 6.2

Varm luft blåser over en plate med areal $1,5 \text{ m}^2$. Hvor mye varme blir overført når temperaturene for luften og platen er henholdsvis 500°C og 20°C ? Anta en konveksjonsfaktor på $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Løsning:

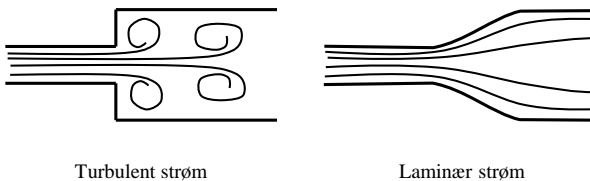
Ta utgangspunkt i ligning 6.1:

$$\begin{aligned}\dot{q}_c &= hA(T_w - T_\infty) \\ &= 20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 1,5 \text{ m}^2 \cdot (20 \text{ }^\circ\text{C} - 500 \text{ }^\circ\text{C}) \\ &= -14400 \text{ W} = -14,4 \text{ kW}\end{aligned}$$

Det blir transportert 14,4 kW fra luften til platen. Minustegnet foran tallsvaret indikerer at varmen går fra luften til platen. Ligning 6.1 er satt opp for å representere at varmen går fra platen til luften.

6.2 Turbulent eller laminær strømning

Hvordan en væske strømmer over et objekt vil påvirke hvor mye energi som transporteres mellom objektet og væsken. En viktig faktor ved beregning av konveksjonstallet (h) er hvordan væsken strømmer, dvs. om strømmingen er turbulent eller laminær. Turbulent strømning⁴ blir ofte beskrevet som virvler som beveger væskepartikler på tvers av strømmens generelle strømningsretning [44, 49]. I laminære strømminger oppstår ikke disse virvlene, og væskepartiklene strømmer uforstyrret i den generelle bevegelsesretningen. I figur 6.2 er det skissert opp eksempler på strømningsbilder for laminære og turbulente strømminger.



Figur 6.2: Strømningsbilder.

For å beskrive hvor turbulent en strøm er, benyttes Reynolds tall⁵ (Re_f). Den senket bokstaven (Subscriptet) f markerer at Reynolds tall skal bestemmes med henblikk på væskens egenskaper ved de temperaturer og trykk som væsken utsettes for i strømmen. Formelen for Reynolds tall er gitt i ligning 6.2 [50].

$$Re_f = \frac{uL}{\nu_f} \quad (6.2)$$

⁴Turbulens er blitt forsøkt beskrevet av en rekke forskere. Mange av disse definisjonene er svært vanskelig å forstå. Den definisjonen som er gitt i denne boken er derfor et forsøk på en definisjon som er enkel å forstå og bruke, men kanskje ikke dekkende for mer dyptgående analyser av turbulente fenomen.

⁵Reynoldstallet beskriver forholdet mellom treghetskrefter og friksjonskrefter.

hvor:

Re_f er Reynolds tall (-)

u er væskens strømningshastighet (m/s)

ν_f er kinematisk viskositet til væsken (m^2/s). Viskositet beskriver evnen til å motstå spenninger, dvs. hvor seigt flytende væsken er.

L er karakteristisk lengde (m). Den karakteristiske lengde vil variere etter utforming av objektet som væsken strømmer over eller igjennom. For en flate vil den karakteristiske lengde være lengden av flaten og for et rør vil det være diameteren.

Generelt kan det lages en inndeling hvor lave Reynolds tall beskriver laminære strømninger og høye tall beskriver turbulente. Overgangen mellom laminære og turbulente strømninger varierer avhengig av de geometriske oppsettene. Skillet mellom laminær og turbulent strøm i et rør skjer ved Reynolds tall rundt 2300, for en plate vil skillet skje ved 10^5 .

Eksempel 6.3

Finn Reynolds tall for vann som strømmer over en horisontal flate med karakteristisk lengde på 3 m, og vurder om strømningen er laminær eller turbulent. Anta at vannet har en hastighet på 10 m/s og en temperatur på 1 °C. Den kinematiske viskositeten (ν) er funnet til å være $1,80 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ for vann ved 1 °C [40].

Løsning:

Reynoldstallet beregnes som følger:

$$\begin{aligned} Re_f &= \frac{uL}{\nu_f} \\ &= \frac{10 \text{ m/s} \cdot 3 \text{ m}}{1,80 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} \\ &= 1,7 \cdot 10^7 \end{aligned}$$

Reynoldstallet blir $1,7 \cdot 10^7$ og dette betyr at strømmen er turbulent fordi Re_f er større enn 10^5 .

Eksempel 6.4

Finn Reynolds tall for luft som strømmer over en horisontal flate med karakteristisk lengde på 1,3 m, og vurder om strømningen er laminær eller turbulent. Anta at luften har en hastighet på 2 m/s og en temperatur på 500 °C. Den kinematiske viskositeten (ν) er funnet til å være $8,1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ for luft ved 500 °C [40].

Løsning:

Reynoldstallet beregnes som følger:

$$\begin{aligned} Re_f &= \frac{uL}{\nu_f} \\ &= \frac{2 \text{ m/s} \cdot 1,3 \text{ m}}{8,10 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} \\ &= 3,2 \cdot 10^4 \end{aligned}$$

Reynoldstallet blir $3,2 \cdot 10^4$ og dette betyr at strømmen er laminær fordi Re_f er mindre en 10^5 .

6.3 Tvungen konveksjon

Tvungen konveksjon oppstår når en væske blir satt i bevegelse av ytre krefter som f.eks. pumpe eller vifte og beveger seg over et objekt. Væskens bevegelser kan både være laminær og turbulent. I denne seksjonen vil det bli sett nærmere på tvungen konveksjon over en horisontal plate som illustrert i figur 6.1. Ligninger for andre geometriske utforminger kan finnes i bøker om varmelære. Det vil bli tatt utgangspunkt i to ligninger som er utviklet for strømminger over horisontale plater. For laminære strømminger brukes ligning 6.3 og for turbulente strømminger brukes ligning 6.4 [40].

$$Nu = \frac{hL}{k_f} = 0,664 Re_f^{1/2} Pr_f^{1/3} \quad (6.3)$$

$$Nu = \frac{hL}{k_f} = 0,037 Re_f^{4/5} Pr_f^{1/3} \quad (6.4)$$

hvor:

Nu er Nussel-tallet (-)

h er konveksjonsfaktor ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$)

L er karakteristisk lengde (m)

k_f er varmeledningsevne ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$)

Re_f er Reynolds tall (-)

Pr er Prandtl-tallet for væsken (-)

f henviser til væskeegenskaper ved væsketemperatur

For å kunne beregne varmeovergangen ved konveksjon, må konveksjonsfaktoren h bestemmes. Konveksjonsfaktoren beregnes fra Nussel-tallet⁶ (Nu). Nussel-tallet er produktet av konveksjonsfaktoren, den karakteristiske lengden (L) og varmeledningsevne til væsken (k_f), se ligning 6.5. Prandtl-tallet⁷ (Pr) er produktet av spesifikk varmekapasitet (c_P) og dynamisk viskositet (μ) dividert med varmeledningsevnen til væsken (k_f).

$$Pr = \frac{c_P \cdot \mu}{k_f} \quad (6.5)$$

Den dynamiske viskositeten er et produkt av kinematisk viskositet (ν) og tetthet (ρ), se ligning 6.6.

$$\mu = \nu \cdot \rho \quad (6.6)$$

Prandtl-tallet kan dermed uttrykkes ved formelen gitt i ligning 6.7.

$$Pr = \frac{c_P \cdot \nu \cdot \rho}{k_f} \quad (6.7)$$

Eksempel 6.5

Bestem konveksjonsfaktoren (h) til et system hvor vann strømmer over en horisontal flate med karakteristisk lengde 3 m. Vannet har en hastighet på 10 m/s og en temperatur på 1 °C. Flaten har en temperatur på 80 °C. Vann ved 1 °C har følgende verdier for de følgende egenskapene:

- Kinematisk viskositeten (ν) er $1,8 \cdot 10^{-6}$ m²/s
- Spesifikk varmekapasitet (c_P) er 4,212 kJ/(kg·K)
- Tetthet (ρ) er 1000 kg/m³
- Varmeledningsevne (k_f) er 0,558 W/(m·K)

Løsning:

Det første steget i beregningen for å bestemme konveksjonsfaktoren, er å finne Reynolds tall. Dette er allerede gjort i eksempel 6.3.

$$Re_f = 1,7 \cdot 10^7$$

Når Reynolds tall er større enn 10^5 , betyr det at strømmen er turbulent. Dette medfører at ligning 6.4 må brukes for å finne Nussel-tallet.

$$\begin{aligned} Pr &= \frac{c_P \cdot \nu \cdot \rho}{k_f} \\ &= \frac{4,212 \cdot 10^3 \text{ J/(kg·K)} \cdot 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3}{0,558 \text{ W/(m·K)}} \\ &= 13,6 \end{aligned}$$

⁶Nussel-tallet (Nu) beskriver forholdet mellom konveksjon og varmeledning. Ved store tall er konveksjon dominerende og ved små er det varmeledning som dominerer.

⁷Prandtl-tallet beskriver forholdet mellom kinematisk viskositet og termisk diffusjon.

Prandtl-tallet er 13,6 for vann ved 1 °C.

$$\begin{aligned} Nu &= \frac{hL}{k_f} \\ &= 0,037 Re_f^{4/5} Pr_f^{1/3} \\ &= 0,037 \cdot (1,7 \cdot 10^7)^{4/5} \cdot (13,6)^{1/3} \\ &= 53753 \end{aligned}$$

Til slutt må ligningen for Nussel-tallet løses med hensyn til konveksjonsfaktoren. Varmeledningsevnen til vann ved 1 °C er 0,558 W/(m·°C).

$$\begin{aligned} Nu &= \frac{hL}{k_f} \\ h &= \frac{Nu \cdot k_f}{L} \\ h &= \frac{53753 \cdot 0,558 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})}{3 \text{ m}} \\ &= 9998 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

Konveksjonsfaktoren for systemet blir tilnærmet 10 000 W/(m²·°C).

Eksempel 6.6

Bestem konveksjonsfaktoren til et system hvor luft strømmer over en horisontal flate med karakteristisk lengde 1,3 m. Luften har en hastighet på 2 m/s og en temperatur på 500 °C. Flaten har en temperatur på 20 °C. Luft ved 500 °C har følgende verdier for de følgende egenskapene:

- Kinematiske viskositeten (ν) er $8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- Spesifikk varmekapasitet (c_p) er 1,092 kJ/(kg·K)
- Tetthet (ρ) er 0,45 kg/m³
- Varmeledningsevne (k) er 0,054 W/(m·K)

Løsning:

Det første steget i beregningen for å bestemme konveksjonsfaktoren, er å finne Reynolds tall. Dette er allerede gjort i eksempel 6.4.

$$Re_f = 3,2 \cdot 10^4$$

Når Reynoldstallet er mindre enn 10^5 , betyr det at strømmen er laminær. Dette medfører at ligning 6.3 må brukes for å finne Nussel-tallet.

$$\begin{aligned} Pr &= \frac{c_p \cdot \nu \cdot \rho}{k_f} \\ &= \frac{1,092 \cdot 10^3 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \cdot 8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \cdot 0,45 \text{ kg}/\text{m}^3}{0,054 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})} \\ &= 0,73 \end{aligned}$$

Prandtl-tallet er 0,73 for luft ved $500 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$\begin{aligned} Nu &= \frac{hL}{k_f} = 0,664 Re_f^{1/2} Pr_f^{1/3} \\ &= 0,664(3,2 \cdot 10^4)^{1/2}(0,73)^{1/3} \\ &= 107 \end{aligned}$$

Til slutt må ligningen for Nussel-tallet løses med hensyn til konveksjonsfaktoren. Varmeledningsevnen til luft ved $500 \text{ }^\circ\text{C}$ er $0,054 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$.

$$\begin{aligned} Nu &= \frac{hL}{k_f} \\ h &= \frac{Nu \cdot k_f}{L} \\ h &= \frac{107 \cdot 0,054 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})}{1,3 \text{ m}} \\ &= 4,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

Konveksjonsfaktoren for systemet blir $4,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

6.4 Naturlig konveksjon

Temperatur- eller tetthetsforskjeller vil medføre at det oppstår bevegelser i en gass eller væske. Varmetransporten som oppstår som følge av disse bevegelsene blir kalt naturlig konveksjon. Konveksjonsfaktoren som brukes i Newtons lov 6.1 blir bestemt ved å bruke Nussel-tallet.

I denne seksjonen vil det bli eksemplifisert ved å se på naturlig konveksjon over en horisontal plate. Nussel-tallet for dette systemet er eksperimentelt utarbeidet og gitt i ligning 6.8 [40].

$$Nu = \frac{hL}{k_m} = C Ra^n \tag{6.8}$$

hvor:

Nu er Nussel tallet (-)

L er karakteristisk lengde (m)

k_m er varmeledningsevnen for gjennomsnittstemperaturen mellom flaten og væske.

Ra er Rayleigh-tallet⁸, som er en dimensjonsløs gruppe (-)

C er en konstant som er avhengige av Rayleigh-tallet.

n er en konstant som er avhengige av Rayleigh-tallet.

I tabell 6.2 er verdiene for C og n gitt for horisontale plater som vender opp og ned i forhold til væskestrømmen, se figur 6.3.

Tabell 6.2: Verdier for C og n for plater [40].

Ra	C		n
	Vendt opp	Vendt ned	
<0,001	0,65	0,35	0
0,001 - 500	1,53	0,83	$\frac{1}{8}$
500 - $2 \cdot 10^7$	0,70	0,38	$\frac{1}{4}$
$2 \cdot 10^7$ - 10^{13}	0,176	0,095	$\frac{1}{3}$

Ligningen for Rayleigh-tallet er gitt i ligning 6.9 [40].

$$Ra = \frac{g\beta Pr L^3}{\nu^2} \cdot (T_w - T_\infty) \quad (6.9)$$

hvor:

Ra er Rayleigh-tallet (-)

g er tyngdekraftens akselerasjon (9,81 m²/s)

β er ekspansjonstallet for væsken (°C⁻¹), se tabell 6.3

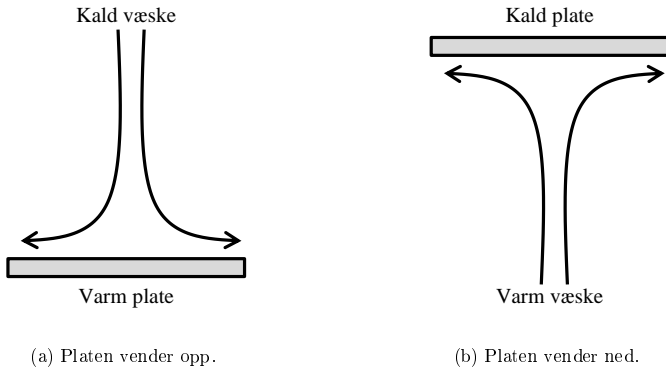
Pr er Prandtl-tallet for væsken (-)

L er karakteristisk lengde (m)

ν er kinematisk viskositet (m²/s)

T_w er temperaturen til flaten

T_∞ er temperaturen til væsken



Figur 6.3: Orientering av flate plater i forhold til væskestrøm.

Tabell 6.3: Termiske verdier for vann [40].

T (°C)	k (W/m K)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	β ($10^{-4}/^\circ\text{C}$)	c_p (kJ/kg K)	Pr (-)
0	0,558	1,80	-0,63	4,212	13,67
20	0,597	1,00	1,82	4,182	7,02
40	0,633	0,659	3,87	4,175	4,31
60	0,658	0,470	5,11	4,181	2,98
80	0,673	0,356	6,32	4,194	2,21
100	0,682	0,294	7,52	4,211	1,75

Ved beregning av Rayleigh-tallet skal gjennomsnittstemperaturen (T_m) for væske og vegg benyttes.

$$T_m = \frac{1}{2}(T_\infty + T_w) \quad (6.10)$$

Rayleigh-tallet kan også uttrykkes som et produkt av Grashofs-tallet⁹ (Gr) og Prandtl-tallet (Pr). I noen bøker er dette den foretrukne måten å presentere Nussel-tallet på.

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (6.11)$$

$$= \frac{gL^3\beta\Delta T}{\nu^2} \cdot Pr \quad (6.12)$$

Eksempel 6.7

Bestem konveksjonsfaktoren (h) til et system hvor vann strømmer over en horisontal flate med karakteristisk lengde 3 m. Vannet har en temperatur på 1 °C. Flaten har en temperatur på 80 °C og vender oppover.

Løsning:

Det første steget i beregningen er å finne gjennomsnittstemperaturen for systemet.

$$\begin{aligned} T_m &= \frac{1}{2}(T_\infty + T_w) \\ &= \frac{1}{2}(1^\circ\text{C} + 80^\circ\text{C}) \\ &= 40,5 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Ved 40,5 °C er følgende verdier hentet fra tabell 6.3:

$$\beta = 3,87 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$Pr = 4,31$$

$$\nu = 0,659 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Rayleigh-tallet blir da:

$$\begin{aligned} Ra &= \frac{g\beta Pr L^3}{\nu^2} (T_w - T_f) \\ &= \frac{9,81 \text{ m/s} \cdot 3,87 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot 4,31 \cdot (3 \text{ m})^3}{(0,659 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2} \cdot (80 \text{ }^\circ\text{C} - 1 \text{ }^\circ\text{C}) \\ &= 8 \cdot 10^{13} \end{aligned}$$

⁸ Rayleigh-tallet beskriver varmetransporten i en væske. Lave Rayleigh-tall gir varmeledning og høye gir konveksjon.

⁹ Grashofs-tallet beskriver forholdet mellom oppdriftskrefter og viskøse krefter.

I henhold til tabell 6.2 blir C lik 0,176 og n lik $\frac{1}{3}$. Ut i fra dette kan Nussel-tallet beregnes.

$$\begin{aligned}Nu &= \frac{hL}{k_m} = C Ra^n \\ &= 0,176 \cdot (8 \cdot 10^{13})^{1/3} \\ &= 7584\end{aligned}$$

Varmeledningevnen til vann ved 40 °C er 0,633 W/m·°C.

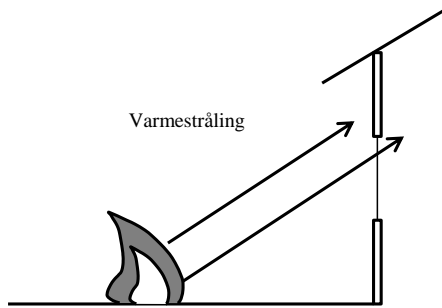
$$\begin{aligned}Nu &= \frac{hL}{k_m} = 7584 \\ h &= \frac{7584 \cdot k}{L} \\ &= \frac{7584 \cdot 0,633 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})}{3 \text{ m}} \\ &= 1600 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})\end{aligned}$$

Konveksjonsfaktoren h til platen blir 1600 W/(m²·°C).

Kapittel 7

Varmestråling

I dette kapitlet vil det bli beskrevet hvordan energi transporteres fra et objekt til et annet via varmestråling. I figur 7.1 er det vist hvordan varmestråling fra en brann kan påvirke et hus, og gjerne spre brannen. Hvor mye energi som transporteres som varmestråling er et resultat av bl.a.: materialeegenskaper, temperatur og synsfaktorer.



Figur 7.1: Illustrasjon av varmestråling fra en brann.

7.1 Beskrivelse av varmestråling

Varmestråling er elektromagnetisk stråling som avgis fra alle objekter som har en temperatur over det absolutte nullpunkt¹ [50]. Hvor mye stråling som blir avgitt er proporsjonal med den absolutte temperaturen opphøyd i 4. potens [50]. Se ligning 7.1.

$$\dot{q}'' \sim T^4 \quad (7.1)$$

hvor:

¹D.v.s. temperaturer over null grader Kelvin, som tilsvarer -273.15 °C.

\dot{q}'' er strålefluks (W/m^2)

T er temperatur (K)

I ligning 7.2 er det satt inn en proporsjonalitetskonstant (σ) slik at ligningen gir den maksimale strålefluksen fra et objekt. De objektene som avgir maksimal stråling i forhold til temperatur, blir beskrevet som svarte legemer (black bodies). Ligning 7.2 blir kalt Stefan-Boltzmanns lov og gjelder kun for varmemestråling fra svarte legemer.

$$\dot{q}'' = \sigma T^4 \quad (7.2)$$

hvor:

\dot{q}'' er strålefluks (W/m^2)

σ er Stefan-Boltzmanns konstant ($5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)

T er temperatur (K)

For ligninger som beskriver varmemestråling er det meget viktig å bruke grader Kelvin i beregningene. Grunnen er at temperaturen opphøyes i 4. potens. For å finne det totale varmetapet fra et objekt som følge av stråling, må ligning 7.2 integreres med hensyn til arealet til objektet som stråler.

$$\frac{d\dot{q}}{dA} = \dot{q}'' \quad (7.3)$$

$$\dot{q} = \int_A \dot{q}'' dA \quad (7.4)$$

$$\dot{q} = \sigma AT^4 \quad (7.5)$$

hvor:

\dot{q} er varmemestråling (W)

A er objektets areal (m^2)

Varmestrålingen som blir avgitt fra svarte legemer inneholder et spekter av stråler med forskjellige bølgelengder (λ). Varmefluks med en bestemt bølgelengde blir omtalt som monokromatisk strålefluks (\dot{q}''_{λ}), og har enhet $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$. Plancks lov beskriver den monokromatiske strålefluksen som en funksjon av bølgelengde og temperatur (T), se ligning 7.6 [71].

$$\dot{q}''_{\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (7.6)$$

hvor:

\dot{q}''_{λ} er monokromatisk strålefluks ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$)

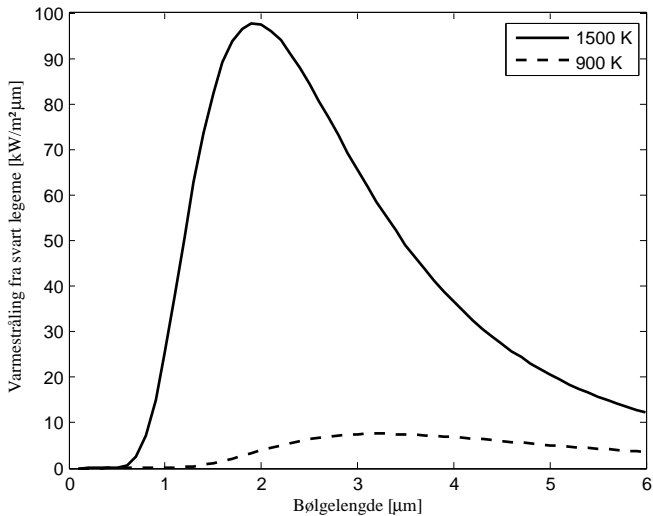
C_1 er en konstant ($3,742 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$)

C_2 er en konstant ($1,4389 \cdot 10^4 \cdot \mu\text{m K}$)

λ er bølgelengde (μm)

T er temperatur (K)

I figur 7.2 er det illustrert hvordan bølgelengden (λ) påvirker stråling fra objekter med temperaturer på henholdsvis 900 og 1500 K (NB: Strålefluksen i figur 7.2 er oppgitt i $\text{kW}/(\text{m}^2 \mu\text{m})$). Ved å integrere Plancks lov med hensyn til bølgelengde (λ), kan Stefan-Boltzmanns lov utledes.



Figur 7.2: Varmestråling fra svarte legemer som funksjon av temperatur.

7.2 Materialer

Egenskapene til materialet som avgir eller mottar varmestråling er viktige for den totale energimengden som overføres.

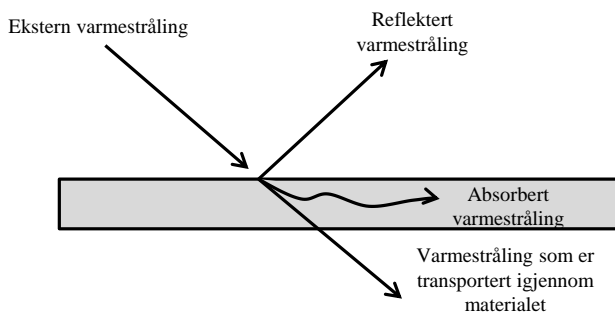
7.2.1 Egenskaper

Et objekt som sender ut og mottar varmestråling, kan ha egenskaper forbundet med: absorpsjon, refleksjon og transmisjon [6, 50, 92]. Absorpsjon og refleksjon er begreper som brukes daglig, og tilsier hvor mye energi som henholdsvis blir tatt opp eller sendt

videre (reflekteres) av et materiale. Transmisjon beskriver hvor mye energi som strømmer igjennom et materiale uten å påvirke dette. I figur 7.3 er det skissert hvordan varmemstrålingen fordeles i et objekt. Det er viktig å se at energien som blir absorbert (α), reflektert (ρ) og transportert igjennom (τ) i sum utgjør den energimengden som stråles inn mot objektet, se ligning 7.7 [6].

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (7.7)$$

Med unntak av gasser, vil transmisjonen for de fleste objekter være svært liten eller tilnærmet lik null. Luft derimot er relativt upåvirket av varmemstråling og transmisjonen er derfor tilnærmet lik en (1) [92].



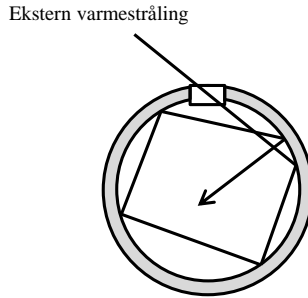
Figur 7.3: Fordeling av varmemstråling som treffer et objekt.

7.2.2 Svarte legemer

Et objekt som absorberer all innkommende varmemstråling ($\alpha = 1$, $\rho = 0$ og $\tau = 0$) blir omtalt som et svart legeme [6, 50]. Det at et materiale ikke reflekterer noe av den innkomne varmemstrålingen, er en viktig teoretisk betraktning for å forstå varmemstråling.

Ingen virkelige objektet er helt svarte². Det som best kan illustrere et svart legeme er et lite hull ned i en boks som er malt svart på innsiden, se figur 7.4. En stråle blir strålt ned gjennom et lite hull og reflektert av sidene i boksen. Strålen blir reflektert en rekke ganger inne i boksen og for hver gang det skjer en refleksjon, taper strålen noe av energien. Når strålen tilslutt kommer ut igjen av åpningen i boksen, vil den være svært energisvak i forhold til den opprinnelige strålen. En iakttagere vil derfor oppfatte hullet som svart, dvs. ingen refleksjon fra åpningen [6, 50]. De objektene som ikke er svarte, blir omtalt som grå legemer.

²Her henpeiler ikke begrepet svart til et objekt med svart farge, men viser til at refleksjonen og transmisjonen er lik null.



Figur 7.4: Illustrasjon av et svart legeme.

7.2.3 Grå legemer

I avsnittet om svarte legemer blir det påpekt at denne type legemer er teoretiske betraktninger. Virkelige objekter, eller grå legemer, er ikke perfekte mottagere av varmestråling ($\alpha < 1$, $\rho > 0$, $\tau \geq 0$) og dette er knyttet til begrepet utstrålingsevne³ eller emissivitet.

Emissivitet (ϵ) er et forholdstall mellom grå og svarte legemer, se ligning 7.8. I mange tilfeller vil emissiviteten være en funksjon av varmestrålingens bølgelengde (λ) og retningen som varmestrålingen blir avgitt i, angitt med vinkelen (ϕ). I denne boken blir det kun arbeidet med diffuse avsendere av varmestråling, dvs. at emissiviteten er uavhengig av retningsvinkelen [6, 92].

$$\epsilon = \frac{\dot{q}''_{\text{Grå legeme}}}{\dot{q}''_{\text{Svart legeme}}} \quad (7.8)$$

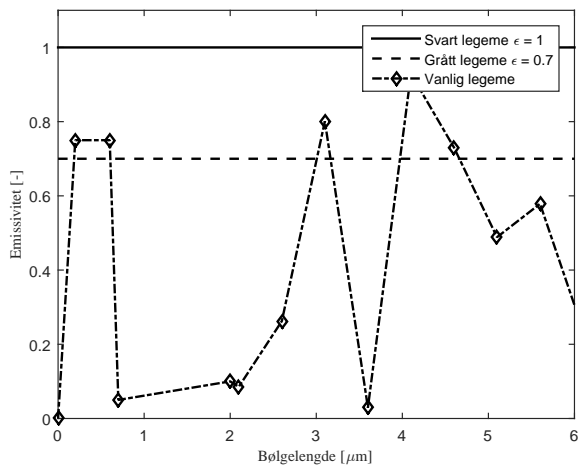
Emissiviteten varierer mellom null og en, avhengig av materialegenskapene til objektet som avgir strålingen. I tabell 7.1 er det gitt eksempler på emissiviteten til noen materialer.

I figur 7.5 er det vist et eksempel på hvordan emissiviteten endres som funksjon av strålingens bølgelengde. Gjennomsnittet av $\epsilon(\lambda)$ er ϵ , og vist med stiplet linje i figuren. I figur 7.6 er det illustrert hvordan emissivitet påvirker stråling fra forskjellige objekter. Det kommer meget klart frem av figuren at vanlige objekter ikke stråler som svarte og grå legemer. Det kan derfor oppstå situasjoner hvor det ikke vil være riktig å anta at varmestrålingen er en funksjon av strålingen fra et svart legeme [50].

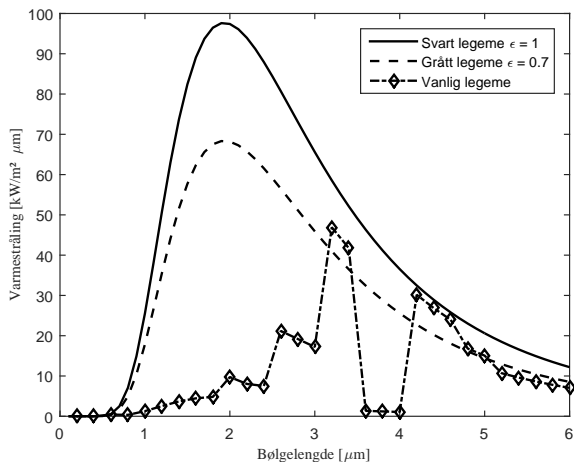
³Utstrålingsevne er et ord som beskriver forskjellen mellom svarte og grå legemer. Tiltross for dette gode norske ordet, er begrepet emissivitet ofte brukt i norske bøker. Dette er synd fordi emissivitet er en fornorskning av det engelske ordet: emissivity.

Tabell 7.1: Materialers emissivitet [52].

Materiale	Emissivitet
Svart legeme	1
Betong, murverk	0,93
Treverk, malt og umalt	0,85 - 0,95
Kobber, oksydert	0,73
Kobber, blank pusset	0,04
Hvitt legeme	0



Figur 7.5: Emissivitet som funksjon av bølgelengde. Emissiviteten fra svarte og grå legemer er konstant, mens vanlige legemers emissivitet er påvirket av bølgelengden til strålingen.



Figur 7.6: Varmestråling som funksjon av bølgelengde for objekt med en temperatur på 1500 K. Objektene har forskjellig emissivitet som igjen påvirker varmemestrålingen.

7.3 Varmestråling mellom objekter

Ved varmemestråling mellom to objekter, er det ikke tilstrekkelig kun å ta hensyn til temperatur og emissivitet. Plasseringen av de to objektene i forhold til hverandre er også viktig, og dette ivaretas av det som omtales som den geometriske synsfaktoren.

Et eksempel kan være forholdet mellom solen og jorden. Kun en liten del av den totale strålingen fra solen treffer jorden. Hvor mye av strålingen som treffer jorden blir beskrevet av synsfaktoren. Figur 7.7 skisserer forholdet mellom solen og jorden.

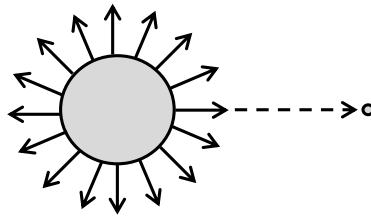
Utleddningen av ligningene for den geometriske synsfaktoren vil bli gitt i denne seksjonen.

7.3.1 Intensitet

Stråling fra et lite areal (dA_1) vil spres utover i et halvkuleformet "skall", se figur 7.8. Intensiteten til strålingen er vanligvis oppgitt som energi pr. areal (\dot{q}''), se ligning 7.9. Dette vil si at energien som stråles ut fra dA_1 , blir fordelt på det tenkte arealet som halvkulen til en hver tid har. Etter hvert som energien beveger seg utover, vil det tenkte arealet øke og intensiteten minke.

$$I(A) \equiv \frac{d\dot{q}}{dA} \quad (7.9)$$

I de tilfeller en skal se på strålingen mellom to objekter, er det fordelaktig å ha intensiteten uttrykt på en måte som tilsier hvor mye det objektet som mottar strålingen

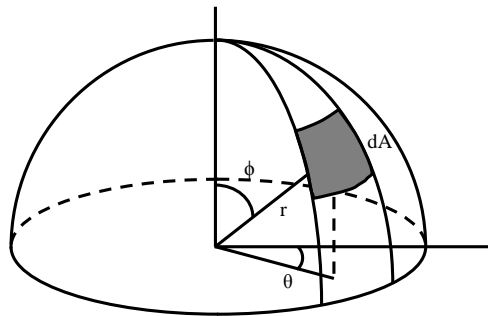


$$\text{Synsfaktor} = \frac{\text{Varmestråling som treffer jorden}}{\text{Total varmemstråling fra solen}}$$

Figur 7.7: Synsfaktor for varmemstråling mellom solen og jorden.

dekker av strålingens halvkule. I korte trekk tilsier dette at energimengden (\dot{q}) over en gitt del av halvkulen er konstant uansett hvor langt bort strålingen er kommet fra utgangspunktet. Intensiteten er dermed forholdet mellom energi (\dot{q}) og romvinkelen $d\omega$, se ligning 7.10.

$$I(\omega) \equiv \frac{d\dot{q}}{d\omega} \quad (7.10)$$



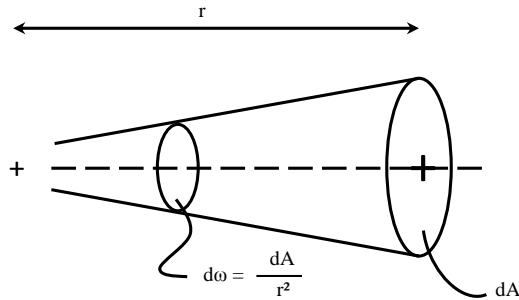
Figur 7.8: Spredning av varmemstråling utover i rommet.

Romvinkel

For å beskrive intensitet ved bruk av romvinkel, tas det utgangspunkt i et tenkt areal (dA) på halvkulen som ligger et stykke vekk fra utgangspunktet hvor strålingen kommer

fra. Romvinkelen er gitt ved det tenkte arealet (dA) på halvkulen dividert med halvkulens radius (r) opphøyd i andre potens. Se ligning 7.11 og figure 7.8.

$$d\omega = \frac{dA}{r^2} \quad (7.11)$$



Figur 7.9: Romvinkel [6].

Ved å ta utgangspunkt i arealet som er skissert i figur 7.8, kan det utledes et uttrykk for dA i ligning 7.11. Uttrykket er satt opp i ligning 7.12⁴, og er basert på opplysninger gitt i figur 7.10.

$$dA = r^2 \sin\phi \delta\phi \delta\theta \quad (7.12)$$

Ligningen for romvinkelen kan dermed forenkles, se ligning 7.13.

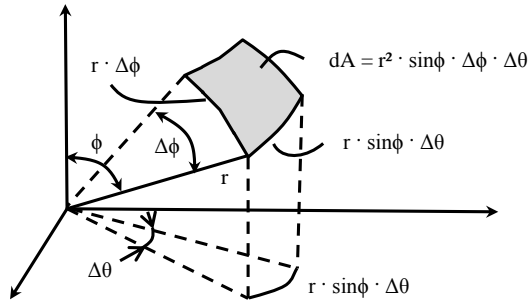
$$d\omega = \sin\phi \delta\phi \delta\theta \quad (7.13)$$

Energimengde

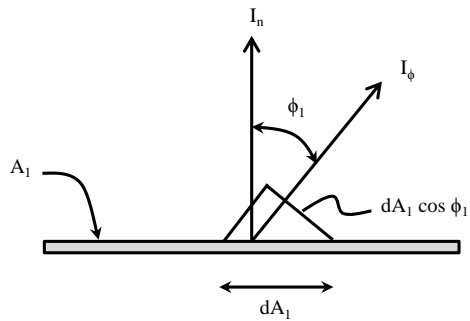
Det må settes opp et uttrykk som beskriver hvor mye av strålingen som kommer fra utstrålingspunktet som treffer det aktuelle arealet dA . Mengden energi som avgis i en bestemt retning er gitt som en funksjon av strålingen som blir avgitt langs normalen til arealet (dA_1) og retningsvinkelen ϕ . Se ligning 7.14 og figur 7.11.

$$d\dot{q}_\phi = d\dot{q}_n dA_1 \cos\phi \quad (7.14)$$

⁴Utledningen av romvinkelen er nærmere beskrevet i Appendix D.



Figur 7.10: Beregning av romvinkel [53].



Figur 7.11: Stråling som funksjon av vinkel [26].

Uttrykk for intensitet

Ved å anta at dA_1 er en diffus flate som avgir stråling i alle retninger, kan det settes opp et uttrykk for intensiteten $I(\omega)$. Intensiteten I er uavhengig av vinklene ϕ og θ . Ligning 7.15 viser at intensiteten er enegimengde pr. areal pr. romvinkel.

$$I = \frac{d\dot{q}_\phi}{dA_1 \cos\phi \sin\phi d\phi d\theta} \quad (7.15)$$

For å finne et uttrykk for intensiteten utfra energien som stråles fra dA_1 , integreres ligning 7.15 over hele halvkulens areal ($0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}, 0 \leq \theta \leq 2\pi$).

$$\dot{q}_{\text{Fra } dA_1}'' = I \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin\phi \cos\phi d\phi d\theta \quad (7.16)$$

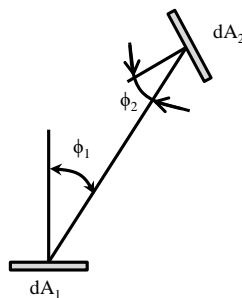
$$\dot{q}_1'' = I \cdot \pi \quad (7.17)$$

$$I = \frac{\dot{q}_1''}{\pi} \quad (7.18)$$

7.3.2 Varmestråling mellom svarte legemer

Varmestråling mellom to objekt er avhengig av den geometriske orienteringen mellom objektene. Orienteringen vil avgjøre hvor mye av strålingen fra det ene objektet som treffer det andre.

For å beregne strålefluks som treffer en flate, må det bli tatt hensyn til vinkelen som den innkommende strålingen har i forhold til normalvektoren til flaten. Denne vinkelen betegnes ϕ_2 . I tillegg må det som vist tidligere bli tatt hensyn til retningsvektoren i forhold til normalvinkelen til den strålende flaten, ϕ_1 . Dette er skissert i figur 7.12.



Figur 7.12: Vinkel mellom normalvektor og varmemstråling.

Mengden energi som stråles ut fra dA_1 og som treffer dA_2 kan beregnes med den

utledete ligning 7.20 [50].

$$dq_{1-2} = I_1 \cos\phi_1 dA_1 d\omega \quad (7.19)$$

$$dq_{1-2} = \frac{\dot{q}_1''}{\pi} \cos\phi_1 dA_1 \frac{dA_2}{r^2} \quad (7.20)$$

Dersom dA_2 ikke står normal på strålingen, se figur 7.12, må uttrykket i ligning 7.20 utvides med vinkelen mellom strålingens retningsvektor og normalvektor til flaten, se ligning 7.21 og 7.22

$$dq_{1-2} = \dot{q}_1'' \cos\phi_1 \cdot dA_1 \frac{dA_2 \cdot \cos\phi_2}{\pi r^2} \quad (7.21)$$

$$dq_{1-2} = \dot{q}_1'' \cos\phi_1 \cos\phi_2 \frac{dA_1 dA_2}{\pi r^2} \quad (7.22)$$

En tilsvarende ligning kan settes opp for tilfellet hvor strålingen går fra dA_2 og til dA_1 .

$$dq_{2-1} = \dot{q}_2'' \cos\phi_1 \cos\phi_2 \frac{dA_2 dA_1}{\pi r^2} \quad (7.23)$$

For å finne hvor mye energi som netto er transportert fra flaten A_1 til A_2 , må ligning 7.23 trekkes fra ligning 7.22, og det resterende uttrykk integreres over begge flatene [50].

$$q_{netto\ 1-2} = (\dot{q}_1'' - \dot{q}_2'') \int_{A_1} \int_{A_2} \cos\phi_1 \cos\phi_2 \frac{dA_1 dA_2}{\pi r^2} \quad (7.24)$$

hvor r er avstanden mellom de to elementene dA_1 og dA_2 .

Tar en bort uttrykkene for varmefluks i ligning 7.24, sitter en igjen med et uttrykk for synsfaktoren F_{1-2} , se ligning 7.25.

$$F_{1-2} = \int_{A_1} \int_{A_2} \cos\phi_1 \cos\phi_2 \frac{dA_1 dA_2}{\pi r^2} \quad (7.25)$$

Eksempel 7.1

Finn synsfaktoren F_{1-2} for flatene beskrevet i figur 7.13.

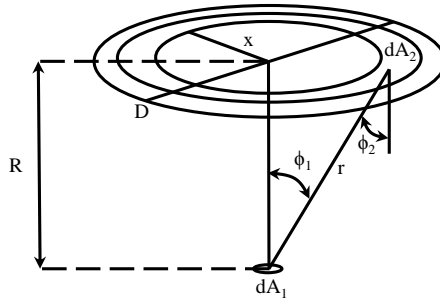
Løsning:

dA_1 er mye mindre enn A_2 og dette medfører at \dot{q}_{2-1}'' er neglisjerbar. dA_2 er arealet til en ring med følgende areal:

$$dA_2 = 2\pi x dx$$

Vinklene ϕ_1 og ϕ_2 er like:

$$\phi_1 = \phi_2$$



Figur 7.13: Vinkel mellom normalvektor og varmestråling for sirkel.

Avstanden (r) er en funksjon av avstanden (R) mellom flatene og radiusen x :

$$r = \sqrt{R^2 + x^2}$$

Vinklene kan da beskrives som følger:

$$\cos \phi_1 = \frac{R}{\sqrt{R^2 + x^2}}$$

Ved å sette inn uttrykkene som er funnet ovenfor, kan følgende ligninger sett es opp:

$$F_{1-2} = \int_{A_1} \int_{A_2} \cos \phi_1 \cos \phi_2 \frac{dA_1 dA_2}{\pi r^2}$$

$$\begin{aligned} F_{1-2} &= \int_x \cos^2 \phi_1 \frac{2\pi x dx}{\pi r^2} \\ &= \int_x \cos^2 \phi_1 \frac{2\pi x}{\pi (\sqrt{R^2 + x^2})^2} dx \\ &= \int_0^{D/2} \frac{2\pi R^2 x}{\pi (R^2 + x^2)^2} dx \\ &= - \left(\frac{R^2}{R^2 + x^2} \right) \Bigg|_0^{D/2} \\ F_{1-2} &= \frac{D^2}{4R^2 + D^2} \end{aligned}$$

7.4 Geometrisk synsfaktor

Med utgangspunkt i ligning 7.25, kan det utledes geometriske synsfaktorer for en rekke forskjellige geometriske systemer. Noen eksempler er gitt i figur 7.14.

En del av ligningene for synsfaktorene er svært tunge å bruke ved beregninger. Det er derfor utviklet synsfaktordiagram for å lette arbeidet med å bestemme den geometriske synsfaktoren for et system.

7.4.1 Synsfaktordiagram

Det er utviklet synsfaktordiagram for en rekke forskjellige systemer. I denne boken vil det kun bli presentert to diagram. Andre diagram kan finnes ved å oppsøke litteratur innen varmemestråling eller utvikle egne ved å bruke utledede ligninger.

I figur 7.15 er det vist synsfaktordiagrammet for to like parallelle plater. Diagrammet viser hvor mye av varmemestrålingen fra den ene platen som treffer den andre. Desto nærmere platene ligger hverandre, desto større blir den geometriske synsfaktoren. Synsfaktoren vil nærme seg en (1) ved svært store plater som ligger svært tett, men det vil alltid være noe varmemestråling som stråles utenfor kantene til platene.

I figur 7.16 er det vist synsfaktordiagrammet for et lite element som blir bestrålt av et rektangel. Ved svært små avstander mellom elementet og rektanget, vil synsfaktoren for elementet gå mot 0,25. Dette tilsier at 25 % av varmemestrålingen fra platen vil treffe elementet.

Eksempel 7.2

Finn den geometriske synsfaktoren til to like parallelle plater som ligger 0,4 meter fra hverandre. Lengden og bredden på platene er henholdsvis 2 og 0,4 meter.

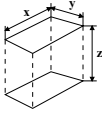
Løsning:

Det første steget ved å bruke synsfaktordiagrammet i figur 7.15 er å finne forholdene $\frac{X}{Z}$ og $\frac{Y}{Z}$.

$$\begin{aligned}\frac{X}{Z} &= \frac{2 \text{ m}}{0,4 \text{ m}} = 5 \\ \frac{Y}{Z} &= \frac{0,4 \text{ m}}{0,4 \text{ m}} = 1\end{aligned}$$

Når forholdene $\frac{X}{Z}$ og $\frac{Y}{Z}$ er funnet kan verdiene plottes inn i figur 7.15. Forholdet $\frac{X}{Z}$ settes av langs x-aksen. x-aksen har en logaritmisk inndeling, dvs. at 10^0 er lik 1. Forholdet $\frac{Y}{Z}$ markeres av linjen $\frac{Y}{Z} = 1$, og det kan settes av et punkt i skjæringen mellom en tenkt linje fra $\frac{X}{Z} = 5$ og linjen $\frac{Y}{Z} = 1$. Fra punktet kan det trekkes en linje inn mot y-aksen, hvor synsfaktoren $F_{(1-2)}$ kan leses av. I dette eksempelet blir synsfaktoren ca. 0,35. Linjene til $\frac{Y}{Z}$ er krumme, og det er viktig å følge krumningen for å finne det riktige krysningspunktet.

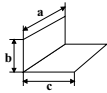
To like rektangler parallelt på hverandre.



$$\bar{X} = X/Z \quad \bar{Y} = Y/Z$$

$$F_{1-2} = \frac{2}{\pi \bar{X} \bar{Y}} \left\{ \ln \left[\frac{(1 + \bar{X}^2)(1 + \bar{Y}^2)}{1 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right]^{1/2} + \bar{X}(1 + \bar{Y}^2)^{1/2} \tan^{-1} \left[\frac{\bar{X}}{(1 + \bar{Y}^2)^{1/2}} \right] \right. \\ \left. + \bar{Y}(1 + \bar{X}^2)^{1/2} \tan^{-1} \left[\frac{\bar{Y}}{(1 + \bar{X}^2)^{1/2}} \right] - \bar{X} \tan^{-1} \bar{X} - \bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} \right\}$$

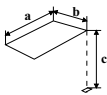
Rektangler 90° på hverandre med felles kant.



$$X = a/c \quad Y = b/c$$

$$F_{1-2} = \frac{1}{\pi Y} \left\{ Y \tan^{-1} \left(\frac{1}{Y} \right) + X \tan^{-1} \left(\frac{1}{X} \right) - \sqrt{X^2 + Y^2} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right) \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \ln \left[\frac{(1 + X^2)(1 + Y^2)}{(1 + X^2 + Y^2)} \left(\frac{X^2(1 + X^2 + Y^2)}{(1 + X^2)(X^2 + Y^2)} \right) X^2 \left(\frac{Y^2(1 + X^2 + Y^2)}{(1 + Y^2)(X^2 + Y^2)} \right) Y^2 \right] \right\}$$

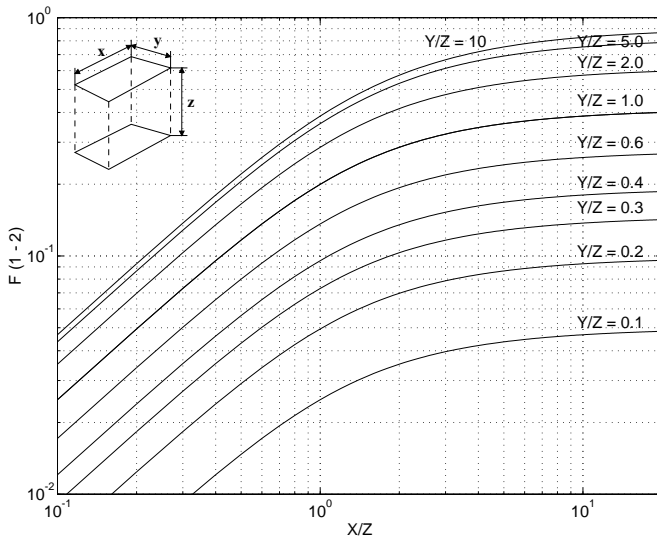
Et rektangel parallelt med et lite element. Elementet er plassert ved det ene hjørne av rektanglet.



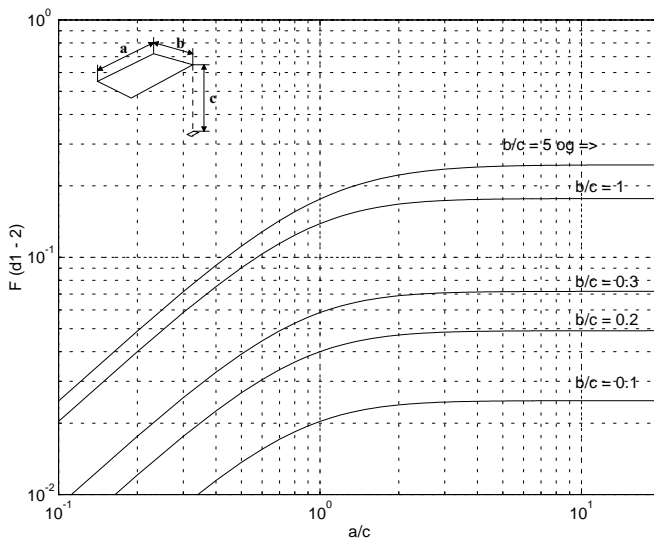
$$\bar{X} = a/c \quad \bar{Y} = b/c$$

$$F_{1-2} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\bar{X}}{\sqrt{1 + \bar{X}^2}} \tan^{-1} \left(\frac{\bar{Y}}{\sqrt{1 + \bar{X}^2}} \right) \right. \\ \left. + \frac{\bar{Y}}{\sqrt{1 + \bar{Y}^2}} \tan^{-1} \left(\frac{\bar{X}}{\sqrt{1 + \bar{Y}^2}} \right) \right]$$

Figur 7.14: Ligninger for geometriske synsfaktorer.



Figur 7.15: To parallelle rektangler som stråler på hverandre.



Figur 7.16: Rektangel som stråler på et lite element.

Eksempel 7.3

Finn den geometriske synsfaktoren til to like parallelle plater som ligger 4 meter fra hverandre. Lengden og bredden på platene er henholdsvis 4 og 0,6 meter.

Løsning:

Det første steget ved å bruke synsfaktordiagrammet i figur 7.15 er å finne forholdene $\frac{X}{Z}$ og $\frac{Y}{Z}$.

$$\begin{aligned}\frac{X}{Z} &= \frac{4 \text{ m}}{4 \text{ m}} = 1 \\ \frac{Y}{Z} &= \frac{0,6 \text{ m}}{4 \text{ m}} = 0,15\end{aligned}$$

Når forholdene $\frac{X}{Z}$ og $\frac{Y}{Z}$ er funnet kan verdiene plottes inn i figur 7.15. I dette eksemplet er det viktig å se at linjen $\frac{Y}{Z} = 0,15$ ikke er skissert. Det må derfor tas utgangspunkt i en tenkt loddrett linje fra $\frac{X}{Z} = 1$ som krysser både $\frac{Y}{Z} = 0,1$ og $\frac{Y}{Z} = 0,2$. Punktet som markerer synsfaktoren ligger mellom $\frac{Y}{Z} = 0,1$ og $0,2$. Det vil som oftest være tilstrekkelig å ta punktet som ligger halvveis mellom de to aktuelle $\frac{Y}{Z}$ -linjene.

Det kan settes av et punkt i skjæringen mellom en tenkt linje fra $\frac{X}{Z} = 1$ og den tenkte linjen $\frac{Y}{Z} = 0,15$. Fra punktet kan det trekkes en linje inn mot y-aksen, hvor synsfaktoren $F_{(1-2)}$ kan leses av. I dette eksemplet blir synsfaktoren ca. 0,035.

Eksempel 7.4

Finn den geometriske synsfaktoren til et lite element som mottar varmestråling fra en parallell plate som ligger 0,4 meter over. Det lille elementet ligger rett under et av hjørnene til platen. Lengden og bredden på platen er henholdsvis 2 og 0,4 meter.

Løsning:

Det første steget ved å bruke synsfaktordiagrammet i figur 7.16 er å finne forholdene $\frac{a}{c}$ og $\frac{b}{c}$.

$$\begin{aligned}\frac{a}{c} &= \frac{2 \text{ m}}{0,4 \text{ m}} = 5 \\ \frac{b}{c} &= \frac{0,4 \text{ m}}{0,4 \text{ m}} = 1\end{aligned}$$

Når forholdene $\frac{a}{c}$ og $\frac{b}{c}$ er funnet kan verdiene plottes inn i figur 7.16. Forholdet $\frac{a}{c}$ settes av langs x-aksen. Forholdet $\frac{b}{c}$ markeres av linjen $\frac{b}{c} = 1$, og det kan settes av

et punkt i skjæringen mellom en tenkt linje fra $\frac{a}{c} = 5$ og linjen $\frac{b}{c} = 1$. Fra punktet kan det trekkes en linje inn mot y-aksen, hvor synsfaktoren $F_{(1-2)}$ kan leses av. I dette eksempelet blir synsfaktoren ca. 0,18.

7.4.2 Beregning av synsfaktorer

Utledningen av en synsfaktor kan være svært vanskelig og tidkrevende. Det er derfor viktig å benytte allerede eksisterende synsfaktorer for å lette et beregningsarbeid. I denne forbindelsen kan det tas utgangspunkt i ligningene 7.26 - 7.28 som beskriver forholdet mellom areal og deres synsfaktorer⁵.

$$A_1 F_{1-2} = A_2 F_{2-1} \quad (7.26)$$

$$F_{1-2} = \frac{A_2}{A_1} F_{2-1} \quad (7.27)$$

$$F_{2-1} = \frac{A_1}{A_2} F_{1-2} \quad (7.28)$$

Ligningene 7.26 - 7.28 tilsier at dersom en synsfaktor er kjent sammen med arealene til de to objektene som stråler på hverandre, så kan den andre synsfaktoren beregnes [50, 92]. I praksis betyr dette at beregningsarbeidet kan forenkles ved å ta utgangspunkt i den synsfaktoren som er lettest å beregne.

Et annet tilfelle er når et objekt stråler på en konstruksjon bestående av to objekt. Synsfaktoren kan her beregnes ved å se på synsfaktorene til de to objektene i den sammensatte konstruksjonen [50]. I figur 7.17 er det vist to objekter som mottar varme-stråling fra et tredje objekt. Synsfaktoren for systemet er gitt i ligning 7.29 og utvidet med arealet i ligning 7.30.

$$F_{1-2,3} = F_{1-2} + F_{1-3} \quad (7.29)$$

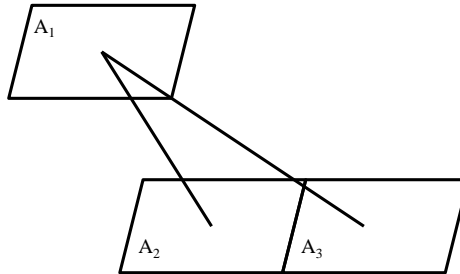
$$A_1 F_{1-2,3} = A_1 F_{1-2} + A_1 F_{1-3} \quad (7.30)$$

Både ligning 7.26 og 7.30 vil være viktige i forbindelse med beregning av stråling mellom virkelige objekter.

Eksempel 7.5

To parallelle sirkulære plater stråler på hverandre. Arealene til platene er på henholdsvis: $A_1 = 3,1 \text{ m}^2$ og $A_2 = 12,6 \text{ m}^2$. Platene ligger 1 meter fra hverandre og synsfaktoren $F_{(1-2)}$ er lik 0,78. Finn synsfaktoren $F_{(2-1)}$.

⁵I denne boken vil det fokuseres på to objekter som stråler på hverandre, eventuelt to objekter som stråler på et tredje, men ikke på hverandre. Mer kompliserte systemer er beskrevet i diverse varme-transportbøker. J.P. Holmans bok: Heat Transfer [50], er et godt utgangspunkt for videre studier i emnet.



Figur 7.17: Tre objekter.

Løsning:

Ved å bruke ligning 7.28 kan en finne synsfaktoren $F_{(2-1)}$.

$$\begin{aligned} F_{2-1} &= \frac{A_1}{A_2} F_{1-2} \\ &= \frac{3,1 \text{ m}^2}{12,6 \text{ m}^2} \cdot 0,78 \\ &= 0,19 \end{aligned}$$

Synsfaktoren $F_{(2-1)}$ blir tilnærmet 0,19.

Eksempel 7.6

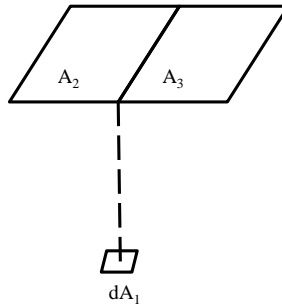
Finne den totale synsfaktoren til et element som mottar stråling fra to like parallelle plater som ligger 0,4 meter ovenfor elementet, se figur 7.18. Lengden og bredden til platene er henholdsvis 2 og 0,4 meter.

Løsning:

Synsfaktoren for en enkelt plate er funnet ved å bruke synsfaktordiagrammet i figur 7.16. Tallverdien til synsfaktoren er 0,18. Når elementet mottar stråling fra to like plater, kan ligning 7.29 benyttes for å beregne den totale synsfaktoren.

$$\begin{aligned} F_{2,3-1} &= F_{2-1} + F_{3-1} \\ &= 0,18 + 0,18 \\ &= 0,36 \end{aligned}$$

Den totale synsfaktoren i dette eksemplet er 0,36.



Figur 7.18: To plater som stråler på et lite element.

7.5 Varmestråling mellom grå legemer

Varmestråling mellom grå legemer knytter sammen synsfaktorer, emissivitet og absorpsjon. Ved beregninger av denne type systemer, er det dermed ikke nok kun å ta hensyn til temperaturene til legemene som stråler på hverandre [70].

I figur 7.19 er det vist to flater som stråler på hverandre. Det blir antatt at varmemestråling ikke transmitteres gjennom flatene ($\tau = 0$), samt at emissivitet (ϵ) og absorpsjon (α) er like for de respektive flatene [70]. Flate 1 vil avgi en strålefluks som tilsvarer:

$$\dot{q}_1'' = \epsilon_1 \sigma T_1^4 \quad (7.31)$$

Deler av denne varmefluksen vil treffe Flate 2 og bli reflektert tilbake til Flate 1. Ligning 7.31 må derfor utvides:

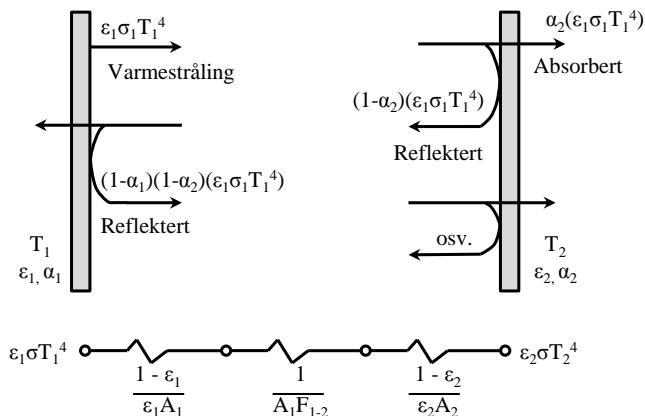
$$\dot{q}_1'' = \epsilon_1 (1 - \epsilon_2) \sigma T_1^4 \quad (7.32)$$

Deler av strålefluksen fra Flate 2 vil igjen bli reflektert av Flate 1, og ligning 7.32 må utvides for å ivareta dette:

$$\dot{q}_1'' = \epsilon_1 (1 - \epsilon_2) (1 - \epsilon_1) \sigma T_1^4 \quad (7.33)$$

Denne prosessen vil fortsette til det ikke er mer varmemestråling igjen, men det kan brukes et forenklet uttrykk. I figur 7.19 og ligning 7.34 er det satt opp et analogt system for varmefluksen, bestående av tre elementer. Det første og siste elementet beskriver emissiviteten eller absorpsjonsevnen til flatene, og det midterste elementet beskriver synsfaktoren mellom de to flatene. Varmestrålingen fra Flate 1 til Flate 2, kan dermed beskrives som følger:

$$\dot{q}_{1-2} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{1-2}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \quad (7.34)$$



Figur 7.19: To grå flater som stråler på hverandre med analogt system. Det tilsvarende analoge systemet er vist under.

Eksempel 7.7

To plater ligger 1 cm fra hverandre, og har lengde og bredde lik 20 m. Beregn varmetransporten mellom de to platene når temperatur og emisivitet er henholdsvis $T_1 = 573 \text{ K}$, $T_2 = 293 \text{ K}$, $\epsilon_1 = 0,8$ og $\epsilon_2 = 0,1$.

Løsning:

Ligning 7.34 kan benyttes for å beregne varmetransporten fra plate 1 til plate 2. For å bruke ligning 7.34 må synsfaktoren F_{1-2} bestemmes ved bruk av synsfaktor-diagrammet i figur 7.15.

$$\frac{X}{Z} = \frac{20 \text{ m}}{0,01 \text{ m}} = 2000$$

$$\frac{Y}{Z} = \frac{20 \text{ m}}{0,01 \text{ m}} = 2000$$

Disse verdiene ligger utenfor det skisserte synsdiagrammet, men det vil være et

godt estimat at F_{1-2} er tilnærmet lik 1. \dot{q}_{1-2} blir da:

$$\begin{aligned}\dot{q}_{1-2} &= \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{1-2}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \\ &= \frac{5,669 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} ((573 \text{ K})^4 - (293 \text{ K})^4)}{\frac{1 - 0,8}{0,8 \cdot 400 \text{ m}^2} + \frac{1}{400 \text{ m}^2 \cdot 1} + \frac{1 - 0,1}{0,1 \cdot 400 \text{ m}^2}} \\ &= \frac{5693,4 \text{ W/m}^2}{0,0256 \text{ m}^{-2}} \\ &= 216891 \text{ W} \\ \dot{q}_{1-2}'' &= \frac{\dot{q}_{1-2}}{A} = \frac{216891 \text{ W}}{400 \text{ m}^2} = 542 \text{ W/m}^2\end{aligned}$$

Dersom varmetransporten skal relateres til areal, blir varmetransporten fra plate 1 til plate 2 ca. 542 W/m².

7.6 Praktiske eksempler

I denne delen vil det bli gitt to eksempler på hvordan varmestrålingsberegninger brukes innen brannvern.

7.6.1 Stråling fra en flamme

Det er utviklet flere modeller for varmestråling fra flammer [26]. I denne boken vil kun en av disse modellene bli presentert. I ligning 7.35 er det oppgitt en formel for varmestråling fra en væskebrann og mot et punkt som ligger et stykke fra selve brannen. Figur 7.20 illustrerer scenarieret.

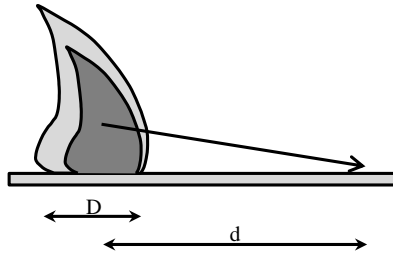
$$\dot{q}_{r,T}'' = 15,4 \left(\frac{d}{D} \right)^{-1,59} \quad (7.35)$$

hvor:

$\dot{q}_{r,T}''$ er varmestrålingen mot et punkt (kW/m²).

d er avstanden fra punktet av interesse til senter av væskedammen (m).

D er diameteren til væskebrannen (m).



Figur 7.20: Varmestråling fra en flamme.

Eksempel 7.8

Beregn varmemestrålingen til et punkt som ligger 20 meter fra senteret av en brann med en diameter på 5 meter.

Løsning:

Bruk ligning 7.35 til å beregne varmemefluksen.

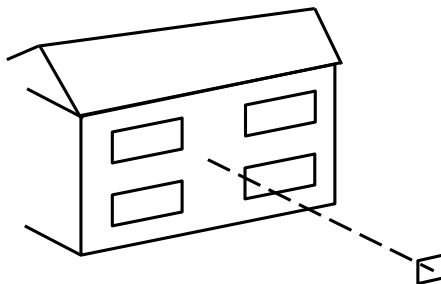
$$\begin{aligned} \dot{q}_{r,T}'' &= 15,4 \left(\frac{d}{D} \right)^{-1,59} \\ &= 15,4 \left(\frac{20 \text{ m}}{5 \text{ m}} \right)^{-1,59} \\ &= 1,7 \text{ kW/m}^2 \end{aligned}$$

Varmestrålingen fra brannen vil være ca. 1,7 kW/m².

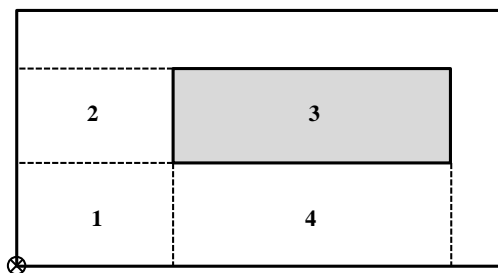
7.6.2 Stråling fra en husbrann

To hus ligger 8 meter fra hverandre, se figur 7.21. Det skal undersøkes om en brann kan spre seg fra det ene huset til det andre som følge av varmemestråling fra vinduene i det ene huset. Den kritiske varmemefluksen er oppgitt til 20 kW/m².

Husene er konstruert av fire identiske elementer med et vindu i hvert element, se figur 7.22. Vinduene i elementene er 2 meter bredt og 1 meter høyt, og ligger 1 meter over og 1 meter bortenfor midtpunktet på veggen. I figur 7.22 tilsvarer midtpunktet på veggen nedre venstre hjørne i elementet. Rommene hvor det brenner er 2,4 meter høyt, 3,6 meter bredt og 3,6 meter dypt.



Figur 7.21: Varmestråling fra et hus til et lite punkt.



Figur 7.22: Oppbyggingen av et element. Senterpunktet på veggen er markert med et kryss i nedre venstrehjørne.

Temperaturen til gassene i rommet er 900 °C. Det vil bli vurdert hvor stor varmekraften er til midtpunktet på veggen til nabohuset, når det blir antatt at det brenner i alle rommene som vender mot nabohuset.

Det første steget i prosessen er å finne varmekraften fra vinduene hvor det brenner. Ligningen for varmemestråling er gitt i ligning 7.36.

$$\dot{q}'' = \epsilon \sigma T_g^4 \quad (7.36)$$

Emissiviteten (ϵ) for gassene i rommet, kan beregnes med ligning 7.37.

$$\epsilon = 1 - e^{-K \cdot X} \quad (7.37)$$

hvor:

K er utstrålingstallet med verdi 1,1 m⁻¹

X er dybden til brannrommet (m)

$$\begin{aligned} \epsilon &= 1 - e^{-KX} \\ &= 1 - e^{-1,1 \text{ m}^{-1} \cdot 3,6 \text{ m}} \\ &= 0,98 \end{aligned}$$

Varmekraften fra vinduene blir da:

$$\begin{aligned} \dot{q}'' &= \epsilon \sigma T_g^4 \\ &= 0,98 \cdot 5,669 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot (1173 \text{ K})^4 \\ &= 105178 \text{ W/m}^2 \\ &= 105 \text{ kW/m}^2 \end{aligned}$$

De geometriske synsfaktorene til systemet kan beregnes ved bruk av synsfaktordiagrammet 7.16. Synsfaktoren fra det ene vinduet i et element, F_3 , kan beregnes via ligning 7.38. F_3 kan relateres til areal 3 i figur 7.22

$$F_3 = F_{1,2,3,4} - F_{1,2} - F_{1,4} + F_1 \quad (7.38)$$

Her er det viktig å se at areal 1 i figur 7.22 blir trukket fra to ganger via $F_{1,2}$ og $F_{1,4}$. F_1 må derfor legges til i ligning 7.38.

$F_{1,2,3,4}$

$$\begin{array}{lll} a = 3 \text{ m} & b = 2 \text{ m} & c = 8 \text{ m} \\ \frac{a}{c} = \frac{3}{8} & \frac{b}{c} = \frac{2}{8} & \\ = 0,375 & = 0,25 & \end{array}$$

Fra synsdiagram 7.16: $F_{1,2,3,4} = 0,025$

$F_{1,2}$

$$\begin{array}{lll} a = 1 \text{ m} & b = 2 \text{ m} & c = 8 \text{ m} \\ \frac{a}{c} = \frac{1}{8} & \frac{b}{c} = \frac{2}{8} & \\ = 0,125 & = 0,25 & \end{array}$$

$F_{1,2} = 0,01$

 $F_{1,4}$

$$\begin{array}{lll} a = 3 \text{ m} & b = 1 \text{ m} & c = 8 \text{ m} \\ \frac{a}{c} = \frac{3}{8} & \frac{b}{c} = \frac{1}{8} & \\ = 0,375 & = 0,125 & \end{array}$$

$F_{1,4} = 0,013$

 F_1

$$\begin{array}{lll} a = 1 \text{ m} & b = 1 \text{ m} & c = 8 \text{ m} \\ \frac{a}{c} = \frac{1}{8} & \frac{b}{c} = \frac{1}{8} & \\ = 0,125 & = 0,125 & \end{array}$$

Synsfaktoren F_1 kan ikke tas ut av figur 7.16 fordi tallverdien $\frac{b}{c}$ er for liten for figuren. For å finne verdien for synsfaktoren, kan ligningen i figur 7.14 benyttes.

$$\bar{X} = \frac{a}{c} = \frac{1}{8} = 0,125$$

$$\bar{Y} = \frac{b}{c} = \frac{1}{8} = 0,125$$

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\bar{X}}{\sqrt{1+\bar{X}^2}} \tan^{-1} \left(\frac{\bar{Y}}{\sqrt{1+\bar{X}^2}} \right) + \frac{\bar{Y}}{\sqrt{1+\bar{Y}^2}} \tan^{-1} \left(\frac{\bar{X}}{\sqrt{1+\bar{Y}^2}} \right) \right] \\ &= \frac{1}{2\pi} \left[\frac{0,125}{\sqrt{1+(0,125)^2}} \tan^{-1} \left(\frac{0,125}{\sqrt{1+(0,125)^2}} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{0,125}{\sqrt{1+(0,125)^2}} \tan^{-1} \left(\frac{0,125}{\sqrt{1+(0,125)^2}} \right) \right] \end{aligned}$$

$F_1 = 0,005$

Synsfaktoren F_3 kan dermed beregnes med ligning 7.38.

$$\begin{aligned} F_3 &= F_{1,2,3,4} - F_{1,2} - F_{1,4} + F_1 \\ &= 0,027 - 0,01 - 0,013 + 0,005 \\ &= 0,009 \end{aligned}$$

Det er fire like elementer som bygger opp veggen, og den totale synsfaktoren for systemet blir fire ganger F_3 .

$$\begin{aligned} F_{tot} &= 4 \cdot F_3 \\ &= 4 \cdot 0,009 \\ &= 0,036 \end{aligned}$$

Den totale varmekraften midt på veggen til nabohuset bli da:

$$\begin{aligned} \dot{q}''_{tot} &= F_{tot} \cdot \dot{q}'' \\ &= 0,036 \cdot 105 \text{ kW/m}^2 \\ &= 3,78 \text{ kW/m}^2 \end{aligned}$$

Det er en varmekraft som ikke vil være i stand til å antenne nabohuset, jfr. den kritiske varmekraften på 20 kW/m^2 .

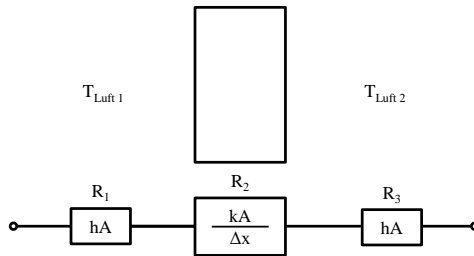
Kapittel 8

Kombinasjoner av varmetransport

Oftest må forskjellige former for varmetransport kombineres for å kunne beskrive et varmetransportssystem. Innen brannteknikk vil både varmestråling og konveksjon tilføre bygningkonstruksjoner energi, som transporteres videre innover i konstruksjonen via varmeledning.

8.1 Varmeledning og konveksjon

Ved kombinasjoner av varmeledning og konveksjon i stasjonære system, blir konveksjonen inkludert i varmeledningstiligningen som et nytt lag. I figur 8.1 er det satt opp et varmetransportssystem bestående av en vegg med forskjellige luftlag på hver side. I et stasjonært system vil varmetransporten gjennom de tre lagene være lik, se ligning 8.1.



Figur 8.1: Varmetrasport gjennom en vegg.

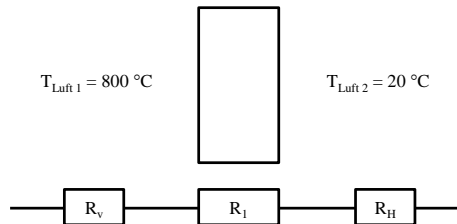
$$\begin{aligned} \dot{q} &= h_1 A (T_{Luft 1} - T_{Vegg A}) \\ &= kA \frac{T_{Vegg A} - T_{Vegg B}}{\Delta x} \\ &= h_2 A (T_{Vegg B} - T_{Luft 2}) \end{aligned} \quad (8.1)$$

Ligningene i 8.1 må løses samtidig, og et lignende system er løst i kapittel 5 om varmeledning. Ligning 8.2 har likhetstrekk med ligningen materialer i serie, og brukes på lik måte.

$$\dot{q} = \frac{T_{\text{Luft 1}} - T_{\text{Luft 2}}}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\Delta x}{kA} + \frac{1}{h_2 A}} \quad (8.2)$$

Eksempel 8.1

Beregn varmegjennomgangen i platen som er skissert i figur 8.2, når lufttemperaturen på henholdsvis høyre- og venstreside er 20 og 800 °C. Konveksjonsfaktorer og materialverdier er gitt i tabell 8.1.



Figur 8.2: Varmetransport gjennom en plate.

Tabell 8.1: Materialegenskaper.

Type	k W/(m·°C)	C _p J/(kg·°C)	h m	b m	t m
Stål	35,0	460	2,0	5,0	0,01

$$h_{\text{Venstre side}} = 6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$$

$$h_{\text{Høyre side}} = 4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$$

Løsning:

Ligning 8.2 kan benyttes for å løse oppgaven.

$$\dot{q} = \frac{T_{\text{Luft 1}} - T_{\text{Luft 2}}}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\Delta x}{kA} + \frac{1}{h_1 A}}$$

$$R_v = \frac{1}{6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \cdot 2 \text{ m} \cdot 5 \text{ m}} = 0,01667 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$R_1 = \frac{0,01 \text{ m}}{35 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot 2 \text{ m} \cdot 5 \text{ m}} = 2,86 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$R_h = \frac{1}{4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \cdot 2 \text{ m} \cdot 5 \text{ m}} = 0,025 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

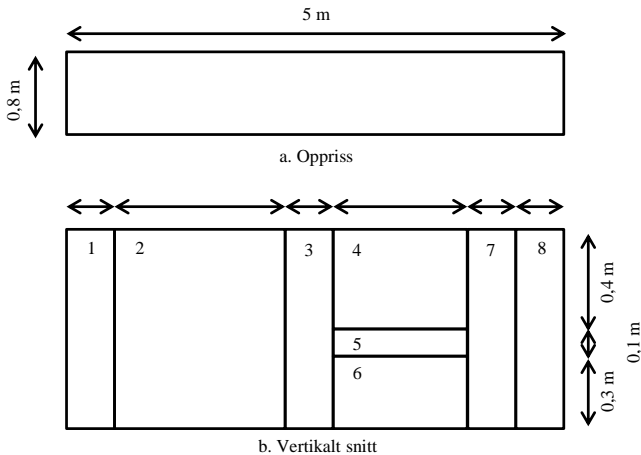
$$\dot{q} = \frac{800 \text{ } ^\circ\text{C} - 20 \text{ } ^\circ\text{C}}{0,01667 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W} + 2,86 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W} + 0,025 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}}$$

$$= 18706 \text{ W}$$

Varmegjennomgangen i konstruksjonen vil være 18 706 W eller 18,7 kW og går fra venstre til høyre.

Eksempel 8.2

Regn ut varmegjennomgangen til veggen når veggen er bygd opp av 3 veggelement med en total høyde på 2,4 meter. Et av elementene er vist i figur 8.3 og materialverdier o.l. er gitt i tabell 8.2. Lufttemperaturene på høyre- og venstresiden er henholdsvis 20 og 825 °C.



Figur 8.3: Åtte materialer i en sammensatt konstruksjon. Tykkelsene er gitt i tabell 8.2.

Tabell 8.2: Materialegenskaper.

Material	Type	k	C_p	h	b	t
		W/(m·°C)	J/(kg·°C)	m	m	m
1	Gips	0,50	1000	0,8	5,0	0,01
2	Isolasjon	0,05	700	0,8	5,0	0,10
3	Gips	0,50	1000	0,8	5,0	0,01
4	Isolasjon	0,05	700	0,4	5,0	0,10
5	Stål	35,0	460	0,1	5,0	0,10
6	Isolasjon	0,05	700	0,3	5,0	0,10
7	Stål	35,0	460	0,8	5,0	0,01
8	Gips	0,50	1000	0,8	5,0	0,01

$$h_{\text{Venstre side}} = 6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$h_{\text{Høyre side}} = 4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

Løsning:

1. Finn de enkelte varmemotstandene R_{1-8}

Bredden på alle materialene er 5 meter.

$$R_1 = \frac{\Delta x_1}{k_1 A_1} = \frac{0,01 \text{ m}}{0,5 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot (0,8 \cdot 5) \text{ m}^2} = 0,005 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_2 = \frac{\Delta x_2}{k_2 A_2} = \frac{0,10 \text{ m}}{0,05 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot (0,8 \cdot 5) \text{ m}^2} = 0,5 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_3 = \frac{\Delta x_3}{k_3 A_3} = \frac{0,01 \text{ m}}{0,5 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot (0,8 \cdot 5) \text{ m}^2} = 0,005 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_4 = \frac{\Delta x_4}{k_4 A_4} = \frac{0,10 \text{ m}}{0,05 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot (0,4 \cdot 5) \text{ m}^2} = 1,0 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_5 = \frac{\Delta x_5}{k_5 A_5} = \frac{0,1 \text{ m}}{35,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot (0,1 \cdot 5) \text{ m}^2} = 5,71 \cdot 10^{-3} \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_6 = \frac{\Delta x_6}{k_6 A_6} = \frac{0,10 \text{ m}}{0,05 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot (0,3 \cdot 5) \text{ m}^2} = 1,33 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_7 = \frac{\Delta x_7}{k_7 A_7} = \frac{0,01 \text{ m}}{35 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot (0,8 \cdot 5) \text{ m}^2} = 7,14 \cdot 10^{-3} \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_8 = \frac{\Delta x_8}{k_8 A_8} = \frac{0,01 \text{ m}}{0,50 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot (0,8 \cdot 5) \text{ m}^2} = 0,005 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_V = \frac{1}{hA} = \frac{1}{6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \cdot (0,8 \cdot 5) \text{ m}^2} = 0,042 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_H = \frac{1}{hA} = \frac{1}{4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \cdot (0,8 \cdot 5) \text{ m}^2} = 0,0625 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

2. Finn varmemotstanden R

$$\begin{aligned}
 R &= R_V + R_1 + R_2 + R_3 + R_x + R_7 + R_8 + R_H \\
 \frac{1}{R_x} &= \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_3} \\
 &= \left[\frac{1}{1,0} + \frac{1}{5,71 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{1,33} \right] \frac{\text{W}}{^\circ\text{C}} \\
 &= 176,9 \frac{\text{W}}{^\circ\text{C}} \\
 R_x &= 5,65 \cdot 10^{-3} \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R &= \left[0,042 + 0,005 + 0,5 + 0,005 + 5,65 \cdot 10^{-3} + 7,14 \cdot 10^{-3} \right. \\
 &\quad \left. + 0,005 + 0,0625 \right] \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \\
 &= 0,632 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}
 \end{aligned}$$

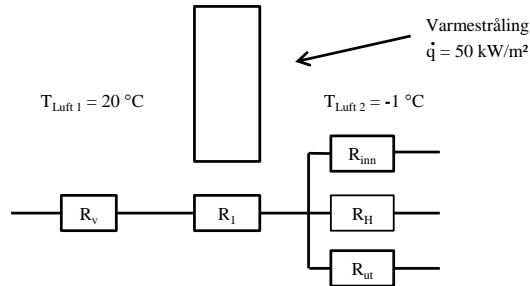
3. Varmegjennomgangen i konstruksjonen

$$\begin{aligned}
 \dot{q} &= -\frac{T_2 - T_1}{R} \\
 &= -\frac{20 \text{ }^\circ\text{C} - 825 \text{ }^\circ\text{C}}{0,632 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}} \\
 &= 1274 \text{ W}
 \end{aligned}$$

Varmegjennomgangen for et element er 1274 W og varmen transporteres fra venstre til høyreside. For å finne den totale varmegjennomgangen for veggen, må varmegjennomgangen for et element ganges med tre. D.v.s at varmegjennomgangen for hele veggen er 3822 W.

8.2 Varmeledning, konveksjon og stråling

Ved kombinasjoner av alle tre formene for varmetransport vil det være behov for å sette opp et varmetransportsystem som ivaretar de tre transporttypene, samt om energien strømmer inn eller ut av et objekt. I figur 8.4 er en plate påvirket av varmeledning, konveksjon og varmestråling. På platens venstreside er lufttemperaturen $20 \text{ }^\circ\text{C}$, og på høyreside er lufttemperaturen $-1 \text{ }^\circ\text{C}$. Videre er det en brann som avgir varmestråling mot platens høyre side som tilsvarer 50 kW/m^2 . Det skal beregnes hvor mye energi som strømmer gjennom platen og hvilken temperatur platen har på høyresiden (T_2). Det antas at emissiviteten (ϵ) er lik 1.



Figur 8.4: Plate påvirket av varmeledning, konveksjon og varmestråling.

Tabell 8.3: Materialegenskaper.

Type	k $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$	C_p $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$	h m	b m	t m
Stål	35,0	460	2,0	5,0	0,01

$$h_{\text{Venstre side}} = 6\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$$

$$h_{\text{Høyre side}} = 4\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$$

For å finne varmegjennomgangen i konstruksjonen, må det settes opp en energibalanse for det ytterste sjiktet på høyresiden av platen. Systemet er satt opp for å beregne temperaturen på høyreside av platen (T_2) og inkluderer varmeledning, konveksjon og den eksterne varmestrålingen. Systemet er satt opp i ligning 8.3.

$$\dot{q}_{\text{inn}} = \dot{q}_{\text{ut}} \quad (8.3)$$

Energien som strømmer inn i platen, er varmestråling fra høyreside og konveksjon fra venstreside. Videre strømmer det energi ut av høyreside.

$$\dot{q}_{\text{konv 1}} + \dot{q}_{\text{stråling, brann}} = \dot{q}_{\text{konv 2}} + \dot{q}_{\text{stråling, vegg}} \quad (8.4)$$

De enkelte delene av ligningen kan fylles ut, og her er det viktig å se at varmeledningen gjennom platen påvirker konveksjonen på venstreside.

- Konveksjon og varmeledning gjennom konstruksjonen:

$$\begin{aligned}\dot{q}_{\text{konv } 1} &= \frac{T_{\text{Luft } 1} - T_2}{\frac{1}{h_v A} + \frac{\Delta x}{kA}} \\ &= \frac{20^\circ\text{C} - T_2}{\frac{1}{6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \cdot 10 \text{ m}^2} + \frac{0,01 \text{ m}}{35 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot 10 \text{ m}^2}} \\ &= 1198 - 60 \frac{\text{W}}{^\circ\text{C}} \cdot T_2\end{aligned}$$

- Varmestråling fra brannen:

$$\dot{q}_{\text{stråling, brann}} = 50000 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot 10 \text{ m}^2 = 500\,000 \text{ W}$$

- Konveksjon fra platen:

$$\begin{aligned}\dot{q}_{\text{konv } 2} &= hA(T_2 - T_{\text{Luft } 2}) \\ &= 4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \cdot 10 \text{ m}^2 \cdot (T_2 - (-1^\circ\text{C})) \\ &= 40 \frac{\text{W}}{^\circ\text{C}} \cdot T_2 + 40 \text{ W}\end{aligned}$$

- Varmestråling fra platen. NB: Det antas at varmemstrålingen fra luften kan ses bortfra.

$$\begin{aligned}\dot{q}_{\text{stråling, plate}} &= \sigma AT_2^{*4} \\ &= 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4) \cdot 10 \text{ m}^2 \cdot (T_2 + 273 \text{ K})^4 \\ &= 5,669 \cdot 10^{-7} \frac{\text{W}}{\text{K}^4} (T_2 + 273 \text{ K})^4\end{aligned}$$

Resultatene fra de fire delene kan nå settes sammen:

$$\begin{aligned}\dot{q}_{\text{konv } 1} + \dot{q}_{\text{stråling, brann}} &= \dot{q}_{\text{konv } 2} + \dot{q}_{\text{stråling, vegg}} \\ 1198 \text{ W} - 60 \frac{\text{W}}{^\circ\text{C}} \cdot T_2 + 500\,000 \text{ W} \\ &= 40 \frac{\text{W}}{^\circ\text{C}} \cdot T_2 + 40 \text{ W} + 5,669 \cdot 10^7 \frac{\text{W}}{\text{K}^4} \cdot (T_2 + 273 \text{ K})^4 \\ 5,669 \cdot 10^7 \frac{\text{W}}{\text{K}^4} \cdot (T_2 + 273 \text{ K})^4 + 100 \frac{\text{W}}{^\circ\text{C}} \cdot T_2 &= 501\,158 \text{ W}\end{aligned}$$

Dette er en 4. gradsligning som må løses via iterasjoner. Det gjøres først et forsøk med 660°C :

$$\begin{aligned}\text{Venstre side} &= 100 \frac{\text{W}}{^\circ\text{C}} \cdot 660^\circ\text{C} + 5,669 \cdot 10^7 \frac{\text{W}}{\text{K}^4} \cdot (660^\circ\text{C} + 273 \text{ K})^4 \\ &= 495\,569 \text{ W} \\ \text{Høyre side} &= 501\,158 \text{ W}\end{aligned}$$

Så gjøres det et forsøk med $665\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\begin{aligned}\text{Venstre side} &= 100 \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C}} \cdot 665\text{ }^{\circ}\text{C} + 5,669 \cdot 10^7 \frac{\text{W}}{\text{K}^4} \cdot (665\text{ }^{\circ}\text{C} + 273\text{ K})^4 \\ &= 505\,351\text{ W} \\ \text{Høyre side} &= 501\,158\text{ W}\end{aligned}$$

Platens temperatur på høyreside ligger mellom 660 og $665\text{ }^{\circ}\text{C}$. Med en temperatur på $663\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\begin{aligned}\text{Venstre side} &= 100 \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C}} \cdot 663\text{ }^{\circ}\text{C} + 5,669 \cdot 10^7 \frac{\text{W}}{\text{K}^4} \cdot (663\text{ }^{\circ}\text{C} + 273\text{ K})^4 \\ &= 501\,420\text{ W} \\ \text{Høyre side} &= 501\,158\text{ W}\end{aligned}$$

Dette er en god nok tilnærming for de videre beregningene.

Når platens veggtemperatur på høyreside er beregnet til $663\text{ }^{\circ}\text{C}$, kan varmegjennomgangen i konstruksjonen beregnes via ligning:

$$\begin{aligned}\dot{q}_{\text{konv 1}} &= \frac{T_{\text{Luft 1}} - T_2}{\frac{1}{h_v A} + \frac{\Delta x}{kA}} \\ &= \frac{20\text{ }^{\circ}\text{C} - 663\text{ }^{\circ}\text{C}}{\frac{1}{6\text{ W}/(\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot 10\text{ m}^2} + \frac{0,01\text{ m}}{35\text{ W}/(\text{m}^{\circ}\text{C}) \cdot 10\text{ m}^2}} \\ &= 1198\text{ W} - 60 \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C}} \cdot 663\text{ }^{\circ}\text{C} \\ &= -38\,582\text{ W}\end{aligned}$$

Varmegjennomgangen i konstruksjonen er ca. 39 kW , og minustegnet indikerer at varmen går fra høyre til venstre.

Kapittel 9

Transient varmeledning

Dersom et objekt med en gitt temperatur blir plassert i et miljø med en annen temperatur, vil det være en periode hvor temperaturen til objektet endres over tid. Perioden fra endringene skjer til objektet igjen har en konstant temperatur eller temperaturgradient kan beskrives av transient varmeledningsteori¹.

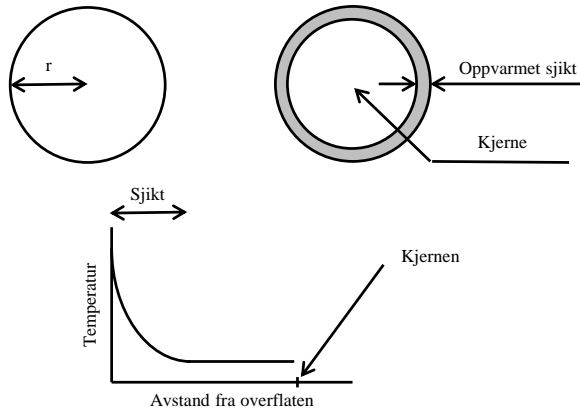
I denne boken vil det bli beskrevet to en-dimensjonale metoder for å beregne transient varmeledning og temperaturutvikling. I de tilfeller varme ledes meget godt, vil en metode for varmeledning i termisk tynne materialer bli beskrevet. Når varme ledes mindre godt, vil dette bli beskrevet av en metode for semi-uendelige objekt.

9.1 Oppvarming av et objekt

Når et objekt blir plassert i et miljø med en annen temperatur, vil det oppstå en situasjon hvor det er forskjellige temperaturer i objektet avhengig av posisjon og tid. Har det nye miljøet en høyere temperatur enn objektet, dannes det et ytre sjikt som har en høyere temperatur enn kjernen av objektet, se figur 9.1. Sjiktets tykkelse vil øke med tiden inntil kjernen av objektet er nådd. Når sjiktet har nådd kjernen, vil det ikke lengre være noe markant skille mellom kjerne- og sjikttemperatur. En videre temperaturutvikling i objektet kan beregnes med en uniform temperatur for hele objektet [6, 50]. Tiden til at det ikke er et skille mellom kjerne- og sjikttemperatur (τ_c), er viktig med hensyn til de forenklingene som kan gjøres etter denne tiden. Før tiden τ_c er nådd, vil det være en varmefront som beveger seg innover i objektet. For å kunne beskrive dette, må det brukes teori for semi-uendelige objekter. Etter at tiden τ_c er passert kan det benyttes en teori for termisk tynne objekter². Teorien for termisk tynne objekter er en forenkelt beregningsmetode, som kan brukes når det ikke er markante temperaturforskjeller i objektet.

¹Transient varmeledning omtales også som ustabil eller “unsteady” varmeledning.

²Engelsk litteratur beskriver dette som Lumped Heat-capacity.



Figur 9.1: Oppvarming av et objekt.

9.2 Termisk tynne objekter

I dette avsnittet beskrives det en metode for beregning av temperaturen i objekter som er svært tynne eller som er laget av materialer med høy varmeledningsevne. Den høye varmeledningsevnen fører til at varmetilførsel eller tap vil gjøre seg gjeldende i alle deler av objektet relativt hurtig. Dette gjør at temperaturen i objektet kan sees på som uniform eller som om det ikke er en temperaturgradient i objektet [6, 50]. Temperaturen i objektet kan dermed beskrives med en temperatur (T) [6].

Ved å se bort fra temperaturgradienten i et objekt, er det gjort en forenkling. Denne forenklingen kan gjøres samtidig som nøyaktighet i svaret opprettholdes når Biot-tallet (Bi) til varmetransportsystemet er mindre enn 0,1, se ligning 9.1 [50]. Biot-tallet er forholdet mellom ekstern motstand mot varmeledning (h) og intern motstand mot varmeledning (k) i et objekt med en karakteristisk dimensjon $\frac{V}{A}$ som er volum dividert med areal. For en kule vil denne karakteristiske dimensjonen være $\frac{1}{3}$ av radiusen r til kulen. For en plate varmet fra en side er den karakteristiske dimensjon ($\frac{V}{A}$) lik tykkelsen til platen (t), mens en plate som er varmet opp fra begge sider har en karakteristisk dimensjon lik halve tykkelsen ($\frac{t}{2}$).

$$Bi = \frac{h V}{k A} < 0,1 \quad (9.1)$$

hvor:

Bi er Biot-tallet (-)

h er konveksjonstallet ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)

k er varmeledningstallet ($W/(m \cdot ^\circ C)$)

V er objektets volum (m^3)

A er objektets areal (m^2)

For å utlede et uttrykk for termisk tynne materialer, må både konserveringsligningen og Newtons lov for avkjøling benyttes. Siden temperaturgradienten i objektet kan ses bort fra, kan uttrykket forenkles ved at all energi som transporteres inn i objektet lagres, se ligning 9.4. Dvs. at generert enrgi ($\dot{q}_{\text{generert}}$) og energi som transporteres ut (\dot{q}_{ut}) er lik null (se ligning 9.2 og 9.3).

$$\dot{q}_{\text{inn}} + \dot{q}_{\text{generert}} = \dot{q}_{\text{ut}} + \dot{q}_{\text{agret}} \quad (9.2)$$

$$\dot{q}_{\text{inn}} + 0 = 0 + \dot{q}_{\text{agret}} \quad (9.3)$$

$$\dot{q}_{\text{inn}} = \rho c_p V \frac{\delta T}{\delta \tau} \quad (9.4)$$

hvor:

\dot{q}_{inn} er varmestrømmen inn i objektet (W)

ρ er tettheten til materialet i objektet (kg/m^3)

c_p er den spesifikke varmekapasiteten til materialet ($\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$)

V er volum (m^3)

T er temperatur ($^\circ\text{C}$)

τ er tid (s)

Varmen som tilføres objektet (\dot{q}_{inn}), kan bestemmes fra Newtons lov for avkjøling (se ligning 9.5). Ved å kombinere ligningen for lagret energi og Newtons lov, kan det utvikles en ligning, ligning 9.6, som beskriver temperaturen i objektet til en hver tid.

$$\dot{q}_{\text{inn}} = hA(T - T_\infty) \quad (9.5)$$

$$hA(T - T_\infty) = -\rho c_p V \frac{\delta T}{\delta \tau} \quad (9.6)$$

Minustegnet i leddet på høyre side, viser til en antagelse om at objektet taper energi til omgivelsene. Dette er i samsvar med leddet til venstre som antar at temperaturen i objektet (T) er høyere enn temperaturen til omgivelsene (T_∞). Ligning 9.6 kan integreres med hensyn til tid for å finne ligningen for varmeledning i termisk tynne materialer.

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-\left[\frac{hA}{\rho c_p V}\right] \tau} \quad (9.7)$$

hvor:

T er temperaturen som søkes ($^\circ\text{C}$)

T_i er starttemperaturen i objektet ($^{\circ}\text{C}$)

T_{∞} er temperaturen i omgivelsen ($^{\circ}\text{C}$)

τ er tiden fra objektet ble utsatt for en endring i omgivelsestemperaturen (s)

Ligning 9.7 er en generell ligning og kan benyttes uavhengig om omgivelsestemperaturen er høyere eller lavere en objektets temperatur.

Eksempel 9.1

Finn temperaturen i en stålkule etter 2 og 4 minutter, når kulen blir påvirket av varm luft med en temperatur på 200°C . Kulens temperatur før påvirkningen er 20°C . Aktuelle verdier for kulen er gitt i tabell 9.1.

Tabell 9.1: Verdier for stålkulen.

r	0,05 m
k	35 W/(m $\cdot^{\circ}\text{C}$)
ρ	7800 kg/(m 3)
c_p	460 J/(kg $\cdot^{\circ}\text{C}$)
h	8,5 W/(m $^2 \cdot^{\circ}\text{C}$)

Løsning:

Før selve beregningen gjøres, må det undersøkes om ligningen for termisk tynde objekter er gyldig for dette tilfellet.

$$\begin{aligned} \frac{V}{A} &= \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{4\pi r^2} = \frac{r}{3} \\ Bi &= \frac{hV}{kA} = \frac{h}{k} \cdot \frac{V}{A} = \frac{h}{k} \cdot \frac{r}{3} \\ &= \frac{8,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot^{\circ}\text{C})}{35 \text{ W}/(\text{m} \cdot^{\circ}\text{C})} \cdot \frac{0,05 \text{ m}}{3} \\ &= 0,004 \end{aligned}$$

Biot-tallet til kulen er mindre enn 0,1, og ligningen kan benyttes.

Først for 2 minutter:

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-\left[\frac{hA}{\rho c_p V}\right] \tau}$$

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-\left[\frac{h \cdot 3}{\rho c_p \cdot r}\right] \tau}$$

$$\frac{T - 200 \text{ °C}}{20 \text{ °C} - 200 \text{ °C}} = e^{-\left[\frac{8,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C}) \cdot 3}{7800 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 460 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{°C}) \cdot 0,05 \text{ m}}\right] 120 \text{ s}}$$

$$\frac{T - 200 \text{ °C}}{20 \text{ °C} - 200 \text{ °C}} = 0,98$$

$$T = 0,98 \cdot (-180 \text{ °C}) + 200 \text{ °C}$$

$$= 23,6 \text{ °C}$$

Så for 4 minutter:

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-\left[\frac{hA}{\rho c_p V}\right] \tau}$$

$$\frac{T - 200 \text{ °C}}{20 \text{ °C} - 200 \text{ °C}} = e^{-\left[\frac{8,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C}) \cdot 3}{7800 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 460 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{°C}) \cdot 0,05 \text{ m}}\right] 240 \text{ s}}$$

$$\frac{T - 200 \text{ °C}}{20 \text{ °C} - 200 \text{ °C}} = 0,97$$

$$T = 0,97 \cdot (-180 \text{ °C}) + 200 \text{ °C}$$

$$= 26 \text{ °C}$$

Eksempel 9.2

En stålkule blir plassert i et miljø med lufttemperatur på 200 °C. Kulens starttemperatur er 20 °C. Når blir temperaturen i kulen 100 °C?

Tabell 9.2: Verdier for stålkulen.

r	0,05 m
k	35 W/(m·°C)
ρ	7800 kg/(m ³)
c_p	460 J/(kg·°C)
h	8,5 W/(m ² ·°C)

Løsning:

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-\left[\frac{hA}{\rho c_p V}\right]\tau}$$

$$\frac{100\text{ °C} - 200\text{ °C}}{20\text{ °C} - 200\text{ °C}} = e^{-\left[\frac{8,5\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C}) \cdot 3}{7800\text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 460\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{°C}) \cdot 0,05\text{ m}}\right]\tau}$$

$$\tau = 4135\text{ s}$$

$$= 69\text{ minutter}$$

9.3 Transient varmeledning for semi-uendelig objekt

I tilfeller hvor det ikke kan antas at temperaturen i objektet er uniform, kan det settes opp en modell for et semi-uendelig objekt. Det som kjennetegner disse tilfellene er en varmefront som endrer posisjon som en funksjon av tid. Antagelsen om et semi-uendelig objekt, blir benyttet ved høye Biot-tall, dvs. større enn 1 [15, 50].

Utleddningen av den matematiske modellen tar utgangspunkt i Fouriers lov, se ligning 9.8. I denne ligningen blir det antatt at det ikke er noen varmeproduksjon i selve objektet.

$$\rho c \frac{\delta T}{\delta \tau} = (k_x \frac{\delta^2 T}{\delta x^2}) + (k_y \frac{\delta^2 T}{\delta y^2}) + (k_z \frac{\delta^2 T}{\delta z^2}) \quad (9.8)$$

I utleddningen av et semi-uendelig objekt, blir det antatt at objektet er en-dimensjonalt³. Fouriers lov reduseres dermed til den partielle differensialligningen⁴ gitt i ligning 9.9.

$$\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\delta T}{\delta t} = 0 \quad (9.9)$$

³Et en-dimensjonalt objekt kan for eksempel være en isolert ledning eller en vegg med lik varme-påvirkning over hele veggflaten.

⁴Følgende forenkling er gjort:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

Med følgende grensebetingelser:

- a Temperaturen i hele objektet er T_i før overflatetemperaturen endres (se ligning 9.10).
- b Ved $t > 0$ blir overflatetemperaturen ($x = 0$) økt fra T_i til T_∞ (se ligning 9.11)

$$T(x, 0) = T_i \quad (9.10)$$

$$T(0, t) = T_\infty \quad (9.11)$$

Den partielle differensialligningen for varmeledning, kan løses ved en Laplace transformasjon, se ligning 9.12. Utledningen som er vist i Tillegg B.1, bygger på løsningen gitt av Carslaw og Jaeger og er ikke triviell [15].

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right] \quad (9.12)$$

Ligningen 9.12 er en generell ligning for både oppvarming og avkjøling. Ved å bruke Gauss error-funksjon (erf), se ligning 9.13, kan ligningen 9.12 brukes til forskjellige materialer, temperaturer og posisjoner uten å løse differensialligningen hver gang. Verdier for error-funksjonen er gitt i Tillegg B.2 [50].

$$\operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right] = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x/2\sqrt{\alpha t}} e^{-\nu^2} d\nu \quad (9.13)$$

Eksempel 9.3

Finn verdien for errorfunksjonen i en avstand av 2,5 cm fra overflaten til et objekt, etter 2 minutter. Materialverdiene er gitt i tabell 9.3.

Tabell 9.3: Verdier for objektet.

Varmeledningsevne	k	35 W/(m·°C)
Tetthet	ρ	7800 kg/m ³
Spesifikk varmekapasitet	c_p	460 J/(kg·°C)

Løsning:

For å finne verdien til errorfunksjonen, må argumentet til funksjonen først bestemmes.

$$\begin{aligned} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} &= \frac{0,025 \text{ m}}{2\sqrt{\frac{35 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})}{7800 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 460 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})} \cdot 120 \text{ s}}} \\ &= 0,37 \end{aligned}$$

I tabellen i Tillegg B.2 er 0,37 ikke oppført. Det må derfor interpoleres mellom 0,36 og 0,38.

$$\begin{aligned} \operatorname{erf}(0,37) &= \operatorname{erf}(0,36) + \frac{\operatorname{erf}(0,38) - \operatorname{erf}(0,36)}{0,38 - 0,36} \cdot (0,37 - 0,36) \\ &= 0,38933 + \frac{0,40901 - 0,38933}{0,02} \cdot (0,01) \\ &= 0,39917 \end{aligned}$$

Verdien for errorfunksjonen med et argument på 0,37 er 0,39917

Eksempel 9.4

Finn temperaturen 2,5 cm fra overflaten til et objekt 2 minutter etter at overflate-temperaturen er hevet til 200 °C. Begynnelsestemperaturen er 20 °C. Materialverdiene er gitt i tabell 9.3. NB: Det er de samme materiale egenskapene som i forrige eksempel.

Løsning:

Temperaturen i objektet kan bestemmes ved å bruke ligning 9.12.

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right]$$

For å kunne løse oppgaven, må først verdien av errorfunksjonen bestemmes.

$$\begin{aligned} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} &= \frac{0,025 \text{ m}}{2\sqrt{\frac{35 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})}{7800 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 460 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})} \cdot 120 \text{ s}} \\ &= 0,37 \end{aligned}$$

Dette er den samme verdien som i forrige eksempel, og errorfunksjonen blir som følger:

$$\operatorname{erf}(0,37) = 0,39917$$

Denne verdien settes inn i ligningen.

$$\begin{aligned} \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} &= \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right] \\ \frac{T - 200 \text{ }^\circ\text{C}}{20 \text{ }^\circ\text{C} - 200 \text{ }^\circ\text{C}} &= 0,39917 \\ T &= 200 \text{ }^\circ\text{C} + (-180 \text{ }^\circ\text{C}) \cdot 0,39917 \\ &= 128 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Temperaturen i objektet 2,5 cm fra overflaten etter to minutter, er 128 °C.

Eksempel 9.5

Stålarmeringen i en betongvegg er dimensjonert slik at den kan miste 30 % av opprinnelig styrke før veggens kollapser p.g.a. påført last. Stålet har mistet 30 % av styrken ved ca. 500 °C. Anta at stålet ikke påvirker varmetransportegenskapene til veggens i nevneverdig grad, slik at veggens kan betraktes som en ren betongvegg.

Dersom armeringen er plassert 4 cm fra overflaten, hvor lenge vil veggens kunne bære lasten dersom overflatetemperaturen økes til 850 °C? Verdien for betongveggens er gitt i tabell 9.4 og veggtemperaturer er opprinnelig 20 °C.

Tabell 9.4: Verdier for objektet.

Varmeledningsevne	k	1,3 W/(m·°C)
Tetthet	ρ	2000 kg/m ³
Spesifikk varmekapasitet	c_p	880 J/(kg·°C)

Løsning:

Tiden til at temperaturen i objektet når en bestemt verdi, kan bestemmes ved å bruke ligning 9.12.

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right]$$

For å kunne løse oppgaven, må først verdien av errorfunksjonen bestemmes.

$$\begin{aligned} \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right] &= \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} \\ &= \frac{500 \text{ °C} - 850 \text{ °C}}{20 \text{ °C} - 850 \text{ °C}} \\ &= 0,42169 \end{aligned}$$

Dette tilsvarer en verdi for $\left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right]$ mellom 0,38 og 0,4 (Se tabellen i Tillegg B.2). Verdien kan bestemmes ved å interpolere.

$$\begin{aligned} \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right] &= 0,38 + \frac{0,4 - 0,38}{\operatorname{erf}(0,4) - \operatorname{erf}(0,38)} \cdot (\operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right] - \operatorname{erf}(0,38)) \\ &= 0,38 + \frac{0,02}{0,42839 - 0,40901} \cdot (0,42169 - 0,40901) \\ &= 0,393 \end{aligned}$$

Når verdien for $\left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right]$ er funnet, kan uttrykket løses med hensyn til tiden t .

$$\begin{aligned}\left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right] &= 0,393 \\ t &= \frac{1}{\alpha} \left(\frac{x}{2 \cdot 0,393}\right)^2 \\ t &= \frac{2000 \text{ kg/m}^3 \cdot 880 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})}{1,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})} \cdot \left(\frac{0,04 \text{ m}}{2 \cdot 0,393}\right)^2 \\ &= 3506 \text{ s}\end{aligned}$$

Veggen vil kunne bære lasten i ca. 58 minutter.

Del IV

Energi- og røykproduksjon

Kapittel 10

Generell kjemi

Brann er en forbrenningsprosess utenfor menneskelig kontroll. Selv om en brann ikke kan kontrolleres slik som andre forbrenningsprosesser, kan den beskrives av de samme kjemiske og fysiske lover.

I dette kapitlet vil det bli gitt en kort innføring i balansering av kjemiske ligninger, den ideelle gasslov, samt damptrykk. Disse tre emnene er viktige for forståelsen av brannkjemi.

10.1 Kjemiske reaksjonsligninger

Kjemiske ligninger kjennetegnes ved at summen av reaktantene¹ er lik summen av produktene, dvs. at dersom seks karbonatomer inngår i en reaksjon må det være seks karbonatomer både på reaktant- og produktsiden av den kjemiske ligningen. Balansering av kjemiske reaksjonsligninger blir derfor en form for bokføring, der summen av atomer er lik på reaktant- og produktsiden [9].

For å kunne holde orden på antall atomer, må både antall molekyler og antall atomer i molekylene inkluderes. For eksempel vil det være tjue oksygenatomer i ti karbondioksidmolekyler.



Hvert CO_2 molekyl inneholder 2 oksygenatomer

$$10 \cdot 2 = 20$$

Dersom antallet molekyler er ukjent, må det settes opp et uttrykk som indikerer hvor mange atomer det er pr. molekyl.

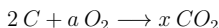


¹En reaktant er et stoff f.eks. oksygen, som skal inngå i en kjemisk reaksjon. Dvs. stoffet har ikke reagert ennå.

For hvert CO_2 molekyl er det 2 oksygenatomer. Antallet molekyler (x) er ukjent. Det kan derfor settes opp et generelt uttrykk for antallet oksygenatomer.

$$x \cdot 2 = 2x$$

For å finne den ukjente x , må det brukes annen informasjon. Dersom det er oppgitt at 2 karbonatomer reagerer med oksygen for å forme karbondioksid, kan dette brukes for å finne den ukjente x .



For hvert CO_2 molekyl er det kun ett karbonatom. Det ukjente antall molekyler (x) må reflekteres av det ene karbonatomet.

$$2 = x \cdot 1$$

To-tallet kommer fra de to karbonatomene som reagerer med oksygen, ett-tallet tilsier at det er ett karbonatom pr. karbondioksidmolekyl.

$$x = 2$$

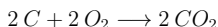
Ligningen viser også at for hvert karbondioksidmolekyl er det forbrukt 2 oksygenatomer. Dette må igjen reflekteres i a , som angir hvor mange oksygenmolekyler (O_2) som er forbrukt i reaksjonen.

$$2 \cdot a = x \cdot 2$$

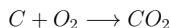
To-tallet foran a angir at det er to oksygenatomer pr. oksygenmolekyl. Videre sier to-tallet etter x at det er to oksygenatom pr. karbondioksidmolekyl. Ovenfor ble x funnet til å være 2.

$$\begin{aligned} 2 \cdot a &= 2 \cdot 2 \\ a &= 2 \end{aligned}$$

Den balanserte ligningen blir da:



Ligningen kan forenkles ved å dele på 2.



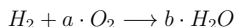
Nedenfor er det gitt flere eksempler på hvordan stoffer reagerer med hverandre og hvordan en kan sette opp et system for bokføring av de enkelte stoffene.

Eksempel 10.1

Balanser ligningen hvor hydrogen og oksygen reagerer sammen og former vann.

Løsning:

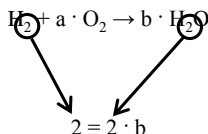
En begynner med å sette opp en mer generell ligning som viser alle reaktanter og produkter.



Ved å ta utgangspunkt i antall hydrogenatomer i vannmolekylet, ser en at dersom det formes ett vannmolekyl så forbrukes det to hydrogenatomer. Disse to hydrogenatomene må være tilstede både på høyre- og venstresiden av reaksjonsligningen, se illustrasjonen i figur 10.1.

$$2 = 2b$$

$$b = 1$$



Figur 10.1: Balansering av antall atomer.

Videre kan det tas utgangspunkt i antall oksygenatomer i vannmolekylet. Det ene atomet må være tilstede på begge sider av ligningen. Dette medfører at det kun er behov for et halvt oksygenmolekyl på venstre-siden.

$$2a = b$$

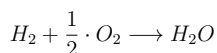
hvor to-tallet foran a henspiller på de to oksygenatomene i molekylet.

$$a = \frac{b}{2}$$

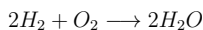
Fordi b er allerede funnet til å være en, medfører dette at:

$$a = \frac{1}{2}$$

Ligningen ser da slik ut:



Det eksisterer ikke halve atomer, og innen kjemifaget er det ikke vanlig å operere med halve molekyler. Ligningen må derfor multipliseres med 2, og den balanserte ligningen blir da:

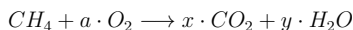


Eksempel 10.2

Balanser reaksjonsligningen for reaksjonen mellom metan og oksygen.

Løsning:

Begynn med å sette opp den generelle ligningen:



Det er kun ett karbonatom på venstre side, x må derfor bli en.

$$x = 1$$

Det er fire hydrogenatomer på venstre side av ligningen, og y blir da lik 2.

$$4 = 2 \cdot y$$

$$y = 2$$

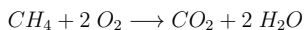
For å finne verdien for a dvs. mengden oksygen, må både x og y inkluderes i beregningen.

$$2 \cdot a = 2 \cdot x + y$$

$$2 \cdot a = 2 \cdot 1 + 2$$

$$a = \frac{4}{2} = 2$$

Den balanserte ligningen blir da som følger:

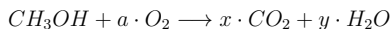


Eksempel 10.3

Balanser reaksjonsligningen for reaksjonen mellom metanol og oksygen. Her er det viktig å se at metanol inneholder et oksygenatom, som må inkluderes i beregningen av oksygenforbruket.

Løsning:

Begynn med den generelle ligningen.



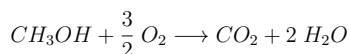
$$x = 1$$

$$4 = 2 \cdot y$$

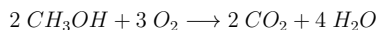
$$y = 2$$

$$2 \cdot a + 1 = 2 \cdot x + y$$

$$a = \frac{4 - 1}{2} = \frac{3}{2}$$



Fordi a er en brøk, må hele uttrykket multipliseres med 2. Den endelige ligningen bli da:



10.2 Gasslover

En viktig antagelse i brannkjemi er at gassene i en forbrenningsprosess tilfredsstillter den ideelle gasslov. Den ideelle gasslov kan sammen med andre gasslover beskrive de fysiske forhold som er tilstede både i og utenfor forbrenningssonen.

10.2.1 Den ideelle gassloven

Den ideelle gassloven beskriver hvordan trykk og temperatur påvirker et volum med en gitt mengde gass. Ingen gass er ideell, men forsøk viser at de fleste gasser vil oppføre seg tilnærmet ideelt ved lave gasskonsentrasjoner [22]. Det er derfor vanlig å anta at gass under normale trykk og temperaturer oppfører seg som en ideell gass. Ved å gjøre antagelsen om en ideell gass, blir det introdusert en liten feil som ses bort fra ved beregninger o.l. [22]. Den ideelle gassloven er gitt i ligning 10.1 [22, 43].

$$pV = nRT \tag{10.1}$$

hvor:

p er trykk.

V er volum.

n er antall mol.

T er temperatur i Kelvin.

R er gasskonstanten, se tabell 10.1.

Gasskonstanten (R) uttrykkes forskjellig, avhengig av enhetene til trykk og volum i ligning 10.1. I tabell 10.1 er det oppgitt noen av de vanligste uttrykkene for gasskonstanten. Tallverdien 8,31431 J/(K·mol) er den formen som samsvarer med SI-systemet. I denne boken vil allikevel verdien $8,20575 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ atm}/(\text{K} \cdot \text{mol})$ bli brukt fordi den er lett å regne med², samt at den samsvarer med eksisterende brannlitteratur [26].

Tabell 10.1: Verdier for gasskonstanten R [26].

Enheter for trykk	Enheter for volum	Enheter for R	Verdier for R
N/m ²	m ³	J/(K·mol)	8,31431
atm	cm ³	cm ³ ·atm/(K·mol)	82,0575
atm	l	l · atm/(K·mol)	0,0820575
atm	m ³	m ³ · atm/(K·mol)	8,20575 · 10 ⁻⁵

Den ideelle gasslov kan videreutvikles til både Boyles og Gay-Lussacs lover dersom det blir gjort antagelser om henholdsvis konstant temperatur og trykk. Når det blir antatt at temperaturen er konstant, tilsier Boyles lov at produktet av trykk og volum er konstant, se ligning 10.2 [26].

$$pV = \text{Konstant} \quad (10.2)$$

Når trykket blir antatt å være konstant, tilsier Gay-Lussacs lov at forholdet mellom volum og temperatur er konstant, se ligning 10.3 [26].

$$\frac{V}{T} = \text{Konstant} \quad (10.3)$$

Eksempel 10.4

Finn antall mol i en gassky på 1 m³, når trykket er 1 atm og temperaturen er 293 Kelvin (dvs. 20 °C).

Løsning:

Den ideelle gasslov kan omskrives slik at antallet mol kan beregnes.

$$n = \frac{pV}{RT}$$

² 1 atm betyr en atmosfæres trykk.

Ved å sette inn tall i ligningen, får en følgende uttrykk:

$$pV = nRT$$

$$n = \frac{1 \text{ atm} \cdot 1 \text{ m}^3}{8,20575 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3 \cdot \text{atm}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 293 \text{ K}}$$

$$n = 41,6 \text{ mol}$$

I en gassky på 1 m^3 med en temperatur på 293 K , er det $41,6 \text{ mol}$ molekyler.

Eksempel 10.5

Finn trykket i en 1 liters gassbeholder som inneholder $0,2 \text{ mol}$ nitrogen ved 500 Kelvin (dvs. $227 \text{ }^\circ\text{C}$).

Løsning:

Ved å omskrive den ideelle gasslov med hensyn til trykk, får en følgende uttrykk:

$$pV = nRT$$

$$p = \frac{nRT}{V}$$

$$= \frac{0,2 \text{ mol} \cdot 8,20575 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3 \cdot \text{atm}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 500 \text{ K}}{\frac{1}{1000} \text{ m}^3}$$

$$p = 8,2 \text{ atm}$$

Trykket i beholderen med 1 l og 500 K , vil være $8,2 \text{ atm}$.

10.2.2 Avogadros lov

Tidligere er det utledet gasslover hvor henholdsvis temperatur og trykk ble holdt konstant. Det kan også utledes en gasslov hvor både temperatur og trykk holdes konstant. Denne gassloven kalles Avogadros lov og beskriver forholdet mellom antall mol (n) og volum (V) [22]. Avogadros lov sier at under like forhold med hensyn til trykk og temperatur, vil gasser med like volum inneholde det samme antallet molekyler. Denne loven kan også utledes fra den ideelle gasslov.

$$\frac{n}{V} = \frac{p}{RT} = \text{Konstant} \quad (10.4)$$

I et tidligere eksempel ble det funnet at det var $41,6 \text{ mol}$ gass i et volum på 1 m^3 . Dette eksempelet tok ikke hensyn til hvilken gass som opptok volumet. I henhold til

Avogadros lov er det heller ikke nødvendig å vite hvilken type gass det er for å finne antall mol eller antall molekyler. Omformingen av den ideelle gasslov viser at gasstype ikke har noen innvirkning på antall mol som beregnes. I denne forbindelse kan det også være verdt å repetere Avogadros tall som sier at et mol gass inneholder $6,023 \cdot 10^{23}$ molekyler.

Eksempel 10.6

Finn antall mol og molekyler i et gassvolum på 50 liter, når temperaturen er 350 Kelvin og trykket er 1,5 atmosfærer.

Løsning:

Ved å ta utgangspunkt i Avogadros lov, kan en finne antall mol ved å sette inn de verdier som er oppgitt.

$$n = \frac{pV}{RT}$$

$$n = \frac{1,5 \text{ atm} \cdot \frac{50}{1000} \text{ m}^3}{8,20575 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3 \cdot \text{atm}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 350 \text{ K}}$$

$$n = 2,61 \text{ mol}$$

Det er 2,61 mol i en gassky på 0,05 m³ eller 50 liter. Antallet molekyler finner en ved å multiplisere antall mol med Avogadros tall.

$$n_{\text{molekyler}} = n \cdot \text{Avogadros tall}$$

$$= 2,61 \text{ mol} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \text{ molekyler/mol}$$

$$n_{\text{molekyler}} = 1,57 \cdot 10^{24} \text{ molekyler}$$

I et gassvolum på 50 liter, med trykk på 1,5 atm og en temperatur på 350 Kelvin, vil det være $1,57 \cdot 10^{24}$ molekyler.

Eksempel 10.7

Finn volumet som $100 \cdot 10^{23}$ molekyler okkuperer ved en temperatur på 200 Kelvin og et trykk på en halv atmosfære.

Løsning:

Før volumet kan bestemmes, må antall mol gass finnes.

$$n = \frac{n_{\text{molekyl}}}{\text{Avogadros tall}}$$

$$= \frac{100 \cdot 10^{23} \text{ molekyler}}{6,023 \cdot 10^{23} \text{ molekyler/mol}}$$

$$= 16,6 \text{ mol}$$

Når antall mol er funnet, kan den ideelle gasslov benyttes for å finne volumet.

$$\begin{aligned} \frac{n}{V} &= \frac{p}{RT} \\ V &= \frac{nRT}{p} \\ &= \frac{16,6 \text{ mol} \cdot 8,20575 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3 \text{atm}}{\text{K mol}} \cdot 200 \text{ K}}{0,5 \text{ atm}} \\ &= 0,54 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$100 \cdot 10^{23}$ molekyler vil okkupere et volum på $0,54 \text{ m}^3$, ved oppgitt trykk og temperatur.

10.2.3 Daltons lov

Den ideelle gassloven kan brukes ved beregninger for både enkeltgasser og for gassblandinger. For å kunne beskrive hendelsene i gassblandinger er det viktig å forstå kriteriene i Daltons lov. Denne loven tilsier at det totale trykket i en beholder er summen av partialtrykkene³ av alle gassene.

Partialtrykket av en enkelt gass er det trykket gassen vil ha i en beholder om den var alene. I luft har oksygen en volumprosent på ca. 21 %. Det vil si at partialtrykket for oksygen er 0,21 atmosfærer i en beholder med luft under normalt trykk. Dersom det er to gasser som er blandet sammen, vil begge gassene ha den samme temperaturen og fylle opp det samme volumet.

$$T = T_{\text{Gass A}} = T_{\text{Gass B}}$$

$$V = V_{\text{Gass A}} = V_{\text{Gass B}}$$

Trykk som følge av den enkelte gass, partialtrykket, er kun avhengig av antall mol av den enkelte gass.

$$p_{\Sigma} = p_A + p_B \quad (10.5)$$

$$p_A = \zeta_A \cdot p \quad (10.6)$$

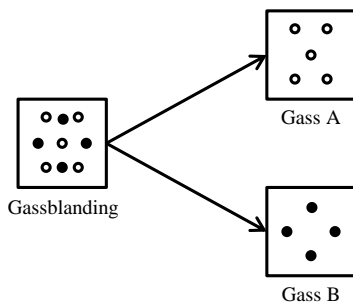
$$p_B = \zeta_B \cdot p \quad (10.7)$$

$$\zeta_A = \frac{n_A}{n_A + n_B} \quad (10.8)$$

$$\zeta_B = \frac{n_B}{n_A + n_B} \quad (10.9)$$

ζ er molfraksjonen for det enkelte stoffet og n er antall mol.

³Partial- eller deltrykkene



Figur 10.2: Gassblanding bestående av to gasser.

Eksempel 10.8

Finn molfraksjonen for oksygen i luft ved romtemperatur og normalt trykk.

Løsning:

Oksygen har en volumprosent på 21 %. Dersom totalvolumet er satt til 1 m^3 , vil oksygen utgjøre $0,21 \text{ m}^3$ av dette volumet.

$$n_{O_2} = \frac{pV_{O_2}}{RT}$$

Ved å sette inn tall får en følgende uttrykk:

$$n_{O_2} = \frac{1 \text{ atm} \cdot 0,21 \text{ m}^3}{8,20575 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3 \cdot \text{atm}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 293 \text{ K}}$$

$$n_{O_2} = 8,73 \text{ mol}$$

Tidligere er det funnet at det er 41,6 mol i en blanding på 1 m^3 . Molfraksjonen til oksygen i blandingen ζ blir da:

$$\zeta_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{n_{O_2} + n_{N_2}}$$

$$= \frac{8,73 \text{ mol}}{41,6 \text{ mol}}$$

$$= 0,21$$

Molfraksjonen for oksygen i luft er 0,21.

Eksempel 10.9

Finn partialtrykket for oksygen i luft.

Løsning:

$$\begin{aligned} p_{O_2} &= \zeta_{O_2} \cdot p \\ \zeta_{O_2} &= 0,21 \\ p_{O_2} &= 0,21 \cdot 1 \text{ atm} \\ &= 0,21 \text{ atm} \end{aligned}$$

Partialtrykket for oksygen i luft er 0,21 atm ved romtemperatur og normalt trykk.

10.3 Gasstetthet

Den ideelle gasslov kan i tillegg til å beskrive forholdet mellom trykk, volum og temperatur, også beskrive tettheten til en gassblanding. Tetthet som vanligvis betegnes med den greske bokstaven rho (ρ), kan bestemmes ved en omforming av den ideelle gasslov. Omformingen gjøres ved å erstatte uttrykket for masse med produktet av antall mol og molvekt (M_W)⁴. Resultatet av omformingen viser at tettheten for en gass eller gassblanding kun er avhengig av temperatur og trykk, se ligning 10.10.

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{m}{V} \\ &= \frac{n \cdot M_W}{V} \\ &= \frac{p \cdot M_W}{R \cdot T} \end{aligned} \quad (10.10)$$

Dersom det blir antatt at trykket, molmassen og gasskonstanten er konstant, viser ligning 10.10 at tetthet er en funksjon av den inverse temperaturen (se ligning 10.11).

$$\rho = \frac{p \cdot M_W}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (10.11)$$

For luft kan ligning 10.11 forenkles til ligning 10.12. Molvekten til luft er beregnet i tabell 10.2, videre er det viktig å se at temperaturen (T) i ligning 10.12 må oppgis i Kelvin.

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{p \cdot M_W}{R} \cdot \frac{1}{T} \\ &= \frac{1 \text{ atm} \cdot 0,02895 \text{ kg/mol}}{8,20575 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3 \cdot \text{atm}}{\text{K} \cdot \text{mol}}} \cdot \frac{1}{T} \\ &= \frac{353}{T} \end{aligned} \quad (10.12)$$

⁴Molvekt tilsvarer massen til 1 mol av et stoff. Molvekten til henholdsvis karbon (C) og oksygen (O₂) er henholdsvis 12 gram og 32 gram.

I en brann vil forbrenningsgassene bli varmet opp. De varme gassene vil bevege seg i forhold til kaldere gasser som befinner seg i omgivelsene. Bevegelsene av de varme gassene skjer som følge av forskjellene i tetthet, og beskrives som konvektive strømmer. Med bakgrunn i ligning 10.13 er forholdet mellom tetthet og temperatur satt opp i ligning 10.15. Det at det er et forhold mellom tetthet og temperatur, er meget nyttig innen branntekniske forsøk. Ved å måle temperatur, kan en få et bilde av tetthetsforskjeller i luften rundt brannen. Disse tetthetsforskjellene er igjen med på å bevege varm røyk til kaldere områder.

$$\rho T = \frac{p \cdot M_W}{R} \quad (10.13)$$

$$\rho_0 T_0 = \rho_\infty T_\infty \quad (10.14)$$

$$\frac{\rho_0 - \rho_\infty}{\rho_0} = \frac{T_\infty - T_0}{T_\infty} \quad (10.15)$$

Eksempel 10.10

Finn tettheten til luft ved 20 °C og 1 atmosfærisk trykk.

Løsning:

For å finne tettheten til luft, må først molvekten bestemmes. Volumfordelingen av gasser i luft er gitt i tabell 10.2. I den samme tabellen er også molvekten for luft beregnet til 0,02895 kg/mol.

Tabell 10.2: Volumfordeling av gasser i luft.

Gass	Kjemisk formel	Volum prosent (%)	Mol-vekt (kg/mol)	Molvekt fraksjon (kg/mol)
Oksygen	O_2	20,95	0,032	$6,70 \cdot 10^{-3}$
Nitrogen	N_2	78,09	0,028	$2,187 \cdot 10^{-2}$
Karbondioksid	CO_2	0,03	0,044	$1,320 \cdot 10^{-5}$
Argon	Ar	0,93	0,0399	$3,7110 \cdot 10^{-4}$
			$M_{W, \text{Luft}} =$	$2,895 \cdot 10^{-2}$

Når molvekten er funnet, kan ligning 10.10 benyttes for å finne tettheten til luft.

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{p \cdot M_W}{R \cdot T} \\ &= \frac{1 \text{ atm} \cdot 0,02895 \text{ kg/mol}}{8,20575 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3 \cdot \text{atm}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 293 \text{ K}} \\ \rho &= 1,204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

eller ved bruk av ligning 10.12

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{353}{T} \\ &= \frac{353}{293 \text{ K}} \\ \rho &= 1,204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\end{aligned}$$

Luft ved 20 °C har en tetthet på 1,204 kg/m³.

Eksempel 10.11

Finn tettheten til oksygen i luft. Volumprosenten av oksygen i luft er 20,95. Molvekten for oksygen (O₂) er 0,032 kg/mol. Anta en temperatur på 20 °C og et trykk på 1 atmosfære.

Løsning:

Før tallverdiene kan settes inn i ligning 10.10, må først partialtrykket og temperaturen bestemmes. Som det fremgår av informasjonen i spørsmålet, har oksygen en volumprosent på 20,95 %. Fra Daltons lov kan det utledes at partialtrykket da er 0,2095 atm. Videre må temperaturen omskrives til Kelvin. 20 °C er lik 293 K.

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{p_{O_2} \cdot M_W}{R \cdot T} \\ &= \frac{0,2095 \text{ atm} \cdot 0,032 \text{ kg/mol}}{8,20575 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3 \cdot \text{atm}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 293 \text{ K}} \\ &= 0,2788 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\end{aligned}$$

Tetthet til oksygen i luft ved 20 °C er 0,2788 kg/m³.

Eksempel 10.12

Hvor stor del utgjør massen til oksygen av den totale luftmassen? Anta en temperatur på 20 °C.

Løsning:

$$\begin{aligned}\rho_{O_2} &= 0,2788 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ \rho_{\text{Luft}} &= 1,204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\end{aligned}$$

Ved å dividere tettheten for oksygen på tettheten til luft kan en finne massefraksjonen til oksygen (Γ_{O_2}).

$$\begin{aligned}\Gamma_{O_2} &= \frac{\rho_{O_2}}{\rho_{Luft}} \\ &= \frac{0,2795 \text{ kg/m}^3}{1,204 \text{ kg/m}^3} \\ &= 0,232\end{aligned}$$

Ved 20 °C utgjøre oksygen 23.2 % av luftens masse.

10.4 Damptrykk

I en forbrenningsprosess er det kun brensel i gassform som kan delta i selve forbrenningen. Dette betyr at væsker og fast stoff må omformes til gass. I dette underkapitlet vil det bli sett på hvordan væsker fordampner og former en blanding av luft og brennbar gass.

Væsker som står i en beholder eller som er fordelt utover et område vil etter hvert fordampe. Denne fordampningen er sterkt temperaturavhengig. Dersom beholderen er lukket, vil det etter hvert oppstå en likevektssituasjon mellom væsken og luften som hindrer videre fordampningstap. Likevektssituasjonen oppstår når volumet over væskeflaten er mettet med gass. Metningen av gass skjer ved det som kalles væskens damptrykk. Damptrykket er partialtrykket til en væske, hvor netto-utveksling av gass over væskeflaten er null [26].

Damptrykket er temperaturavhengig, og kan beskrives av Clapeyron-Clausius ligning, se ligning 10.16, hvor p° er damptrykket og L_v er fordampningsvarmen til væsken.

$$\frac{d(\ln p^\circ)}{dT} = \frac{L_v}{RT^2} \quad (10.16)$$

Clapeyron-Clausius ligning kan integreres, og i ligning 10.17 er det gjengitt en av de vanligste integrerte formene [26].

$$\log_{10} p^\circ = -0,2185 \cdot \frac{E}{T} + F \quad (10.17)$$

hvor:

p° er damptrykket gitt i mmHg (Millimeter kvikksølv søyle).

E er den molare fordampningsvarmen gitt i tabell 10.3.

F er en konstant gitt i tabell 10.3.

T er temperaturen til væsken gitt i Kelvin.

Tabell 10.3: Konstanter i damptrykk-ligningen [95].

Væske	Formel	E	F	Temperatur- område (°C)
n-Pentan	n-C ₅ H ₁₂	6595,1	7,4897	-77 til 191
n-Heksan	n-C ₆ H ₁₄	7627,2	7,7171	-54 til 209
Cycloheksan	c-C ₆ H ₁₂	7830,9	7,6621	-45 til 257
n-Octan	n-C ₈ H ₁₈	9221,0	7,8940	-14 til 281
iso-Octan	(2,2,4 Trimethyl pentane)	8548,0	7,9349	-36 til 99
n-Decan	n-C ₁₀ H ₂₂	10912,0	8,2481	17 til 173
n-Dodecan	n-C ₁₂ H ₂₆	11857,7	8,1510	48 til 346
Metanol	CH ₃ OH	8978,8	8,6398	-44 til 224
Etanol	C ₂ H ₅ OH	9673,9	8,8274	-31 til 242
n-Propanol	n-C ₃ H ₇ OH	10421,1	8,937	-15 til 250
Acetone	(CH ₃) ₂ CO	7641,5	7,9040	-59 til 214
Methyl ethyl ketone	CH ₃ CO·CH ₂ CH ₃	8149,5	7,9593	-48 til 80
Benzene	C ₆ H ₆	8146,5	7,8337	-37 til 290
Toluen	C ₆ H ₅ CH ₃	8580,5	7,7194	-28 til 31
Styren	C ₆ H ₅ CH=CH ₂	9634,7	7,9220	-7 til 145

Fra tabell 10.3 kan en se at den molare fordampningsvarmen (E) for væsker, med få unntak, varierer lite. Dette stemmer bra med Debye-temperaturen som er presentert i kapitlet om varmelære.

Det er også mulig å finne damptrykket over en væske bestående av en blanding av flere væsker. For å kunne gjennomføre denne type beregning, er det påkrevet at væskene i blandingen ikke påvirker hverandre. Damptrykket er viktig for å kunne bestemme brennbarhetsgrensene til gass og væsker.

Eksempel 10.13

Finn damptrykket til etanol både ved 20 °C og 50 °C. Uttrykk damptrykket i Pascal.

Løsning:

For å kunne bruke ligningen for damptrykk, må temperaturene som damptrykket skal beregnes ved omgjøres til grader Kelvin.

$$20\text{ °C} = 293\text{ K}$$

$$50\text{ °C} = 323\text{ K}$$

I tabell 10.3 er det oppgitt følgende verdier for etanol:

$$E = 9673,9$$

$$F = 8,8274$$

For 20 °C:

$$\begin{aligned} \log_{10} p^\circ &= -0,2185 \cdot \frac{E}{T} + F \\ &= -0,2185 \cdot \frac{9673,9}{293\text{ K}} + 8,8274 \\ &= 1,6132 \\ p^\circ &= 41,04\text{ mmHg} \\ &= 41,04\text{ mmHg} \cdot 133,32 \frac{\text{Pa}}{\text{mmHg}} \\ &= 5472\text{ Pa} \end{aligned}$$

Damptrykket for etanol ved 20 °C er 41 mmHg eller 5472 Pa.

For 50 °C:

$$\begin{aligned}
 \log_{10} p^\circ &= -0,2185 \cdot \frac{E}{T} + F \\
 &= -0,2185 \cdot \frac{9673,9}{323 \text{ K}} + 8,8274 \\
 &= 2,2833 \\
 p^\circ &= 192,0 \text{ mmHg} \\
 &= 192,0 \text{ mmHg} \cdot 133,32 \frac{\text{Pa}}{\text{mmHg}} \\
 &= 25597 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

Damptrykket for etanol ved 50 °C er 192 mmHg eller 25597 Pa.

Eksempel 10.14

n-Heksan har en nedre brennbarhetsgrense på 1,2 % ved -26 °C. Verifiser at disse tallene stemmer overens.

Løsning:

Verdiene for n-Heksan er:

$$T = 247 \text{ K}$$

$$E = 7627,2$$

$$F = 7,7171$$

$$\begin{aligned}
 \log_{10} p^\circ &= -0,2185 \cdot \frac{E}{T} + F \\
 &= -0,2185 \cdot \frac{7627,2}{247 \text{ K}} + 7,7171 \\
 &= 0,96996 \\
 p^\circ &= 9,33 \text{ mmHg} \\
 &= 9,33 \text{ mmHg} \cdot 133,32 \frac{\text{Pa}}{\text{mmHg}} \\
 &= 1244 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

Damptrykket til n-Heksan ved -26 °C er 1244 Pa. Lufttrykket ved 1 atmosfærisk trykk er 101 300 Pa.

$$\begin{aligned}
 \text{Konsentrasjon} &= \frac{1244 \text{ Pa}}{101\,300 \text{ Pa}} \cdot 100 \\
 &= 1,22 \%
 \end{aligned}$$

Tallene stemmer godt overens, og er dermed verifisert.

Kapittel 11

Brannkjemi

I forbrenningssonen til en brann må det være tilstede en riktig blanding av brensel, oksygen og energi. Videre har forskning vist at dersom det skal kunne skje en forbrenning, må det også være frie radikaler tilstede i forbrenningssonen [10]. De frie radikalene inngår i kjedereaksjonene som foregår inne i selve forbrenningssonen. Nedenfor vil begrepene brannfirkant, brensel og kjedereaksjon bli presentert nærmere.

11.1 Brannfirkanten

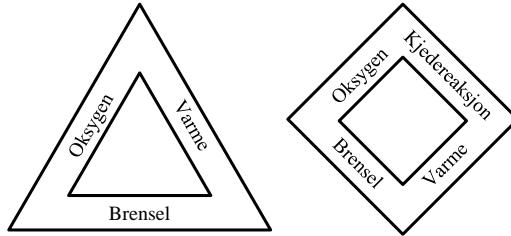
Innen brannteknisk litteratur blir det ofte fremstilt som om det er tilstrekkelig med brensel, oksygen og varme for å starte og opprettholde forbrenningen i en brann. Dette forholdet blir ofte illustrert med en branntrekant, se figur 11.1 [64]. Branntrekanten er en tilstrekkelig illustrasjon for dem som kun ønsker en kort introduksjon til branntekniske emner. De som studerer brann, må også ha kjennskap til de interne kjemiske reaksjonene som foregår inne i en forbrenningssone.

Frie radikaler og kjedereaksjoner spiller en avgjørende rolle i de kjemiske reaksjonene som foregår inne i forbrenningssonen til en brann. Det er ikke tilstrekkelig kun å kjenne til reaktantene og sluttproduktene som inngår i forbrenningen. De mellomliggende prosessene som beskrives av kjedereaksjonene må også forstås [33]. For å illustrere viktigheten av kjedereaksjonene, er branntrekanten utvidet til en brannfirkant, se figur 11.1. I engelsk og amerikansk litteratur blir branntrekanten utvidet til en tetraeder¹ og ikke en firkant [10]. Dette er illustrert i figur 11.2.

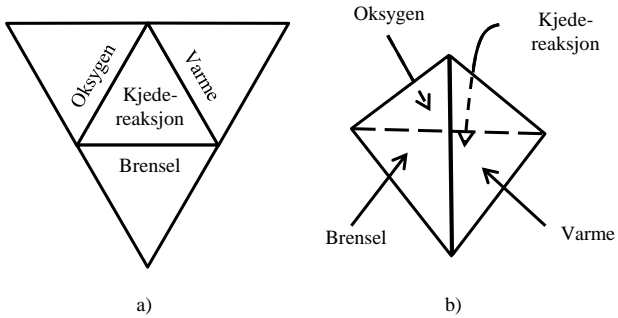
11.1.1 Brensel

De som arbeider med brannbekjempelse eller forebyggende arbeid, vil i stor grad komme i kontakt med brenselstyper som er karbonbasert. Ett unntak er hydrogengass (H_2). Brensel kommer i tre aggregattilstander: fast stoff, væske og gass. Dersom en forbrenning med flamme skal kunne oppstå og opprettholdes, må brenselet være i gassform. Faste stoff og væsker må omdannes til gass før de kan delta i forbrenningen [26, 84], se figur

¹En tetraeder er en pyramide med trekantet grunnflate.

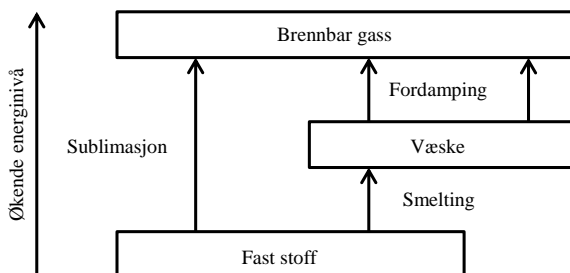


Figur 11.1: Branntrekant og -firkant.



Figur 11.2: Branntetraeder.

11.3. Væsker fordampes og danner en luft/gass-blanding som kan antenne, dersom blandingforholdet er riktig. Faste stoffer må i mange tilfeller først smelte og så fordampe før en forbrenningsreaksjon kan oppstå. Det er også en del faste stoffer som sublimerer eller gjennomgår en kjemisk spaltning², og avgir gasser direkte. Trevirke er et godt eksempel på et slikt materiale [26].



Figur 11.3: Bensel i forskjellige aggregattilstander.

Brenselets opprinnelige aggregattilstand vil i mange tilfeller kunne påvirke sammensetningen av forbrenningsproduktene. Grunnen er at ufullstendig forbrenning av gass, væske og faste stoffer vil resultere i mange forskjellige kjemiske sluttprodukter [26]. Sluttproduktene vil være tilstede i røyken som blir avgitt av brannen. Røyken kan inneholde store mengder giftige gasser som i verste fall kan drepe. I tillegg er det ofte svært mye partikler i røyken og disse vil redusere sikten i rønningsveiene.

11.1.2 Oksygen og energi

Oksygen og energi er sentrale faktorer i en forbrenning. Oksygen vil være tilgjengelig gjennom luft som blir trukket inn i forbrenningssonen p.g.a. trykk- og tetthetsforskjeller. Luft inneholder vanligvis 20,95 % oksygen, og tilfører dermed forbrenningen oksygen så lenge lufttilførselen er tilfredstillende [26]. Det vil først oppstå oksygenmangel når lufttilgangen hindres. Lufttilgangen hindres vanligvis ved å lukke dører og vinduer eller ved å bruke slukkesystem som fortrenger oksygen, f.eks. slukkegasser, vanntåke eller skum.

Energi for å opprettholde forbrenningen må produseres i selve forbrenningssonen. Energiproduksjonen må være tilstrekkelig til både å opprettholde temperaturen i forbrenningssonen og bidra til at en tilstrekkelig del av brenselet blir omgjort til brennbar gass. Temperaturen i forbrenningssonen må holdes rundt 1500 - 1600 K (ca. 1230 - 1330

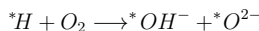
²Den kjemiske spaltningen omtales som pyrolyse innen brannteknikk og står for en kjemisk nedbrytning. Innen forbrenningsteori er pyrolyse beskrevet som nedbrytning av et stoff uten oksygen til stede.

°C) for å opprettholde forbrenningen³ [26]. Videre er det en god antagelse at 20 - 40 % av energien som produseres i brannen stråles vekk fra flammen og til omgivelsene [33, 59, 60]. I tabell 12.1 blir det gitt noen eksempler på hvor mye energi som stråles vekk. Energien som stråles vekk fra flammen, bidrar ikke til oppvarmingen av forbrenningsproduktene.

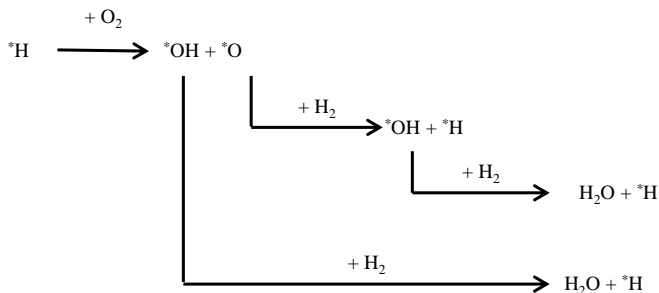
11.1.3 Kjedereaksjon

Når to eller flere stoffer reagerer med hverandre, blir kjemiske reaksjonsligninger benyttet for å beskrive mengdene av reaktanter og sluttprodukter. De mellomliggende prosessene som ofte blir kalt kjedereaksjoner eller katalytiske-reaksjoner, blir ikke beskrevet i de kjemiske reaksjonsligningene. I de katalytiske prosessene inngår det frie radikaler (ioner, atomer og molekyler) som er nødvendige for å holde en prosess i gang, men som selv ikke brukes opp eller forsvinner fra reaksjonssonen. Frie radikaler kjennetegnes ved at det ytterste elektronshellet til atomet, ionet eller molekylet ikke er fylt opp, dvs. uparede elektroner [99]. Ledige plasser i det ytre elektronshellet blir markert med *, f.eks. *H.

Et eksempel på en slik kjedereaksjon, er ved forbrenningen av en hydrogen-oksygenblanding. En tennkilde vil forme enslige hydrogenatomer. Et hydrogenatom (*H) vil lett reagere med et oksygenmolekyl (O_2), og danner et hydroksidion ($*OH^-$) og et enslig oksygenion ($*O^{2-}$) [33]:



Både hydroksidionet og oksygenionet vil reagere med omliggende hydrogenmolekyler fra blandingen, som illustrert i figur 11.4. For å øke forståelsen av emnet, er ladningene til ionene ikke inkludert i den videre diskusjonen av kjedereaksjoner.



Figur 11.4: Illustrasjon av en kjedereaksjon.

Introduksjonen av et enkelt hydrogenatom som et fritt radikal i en hydrogen-oksygenblanding, vil resultere i produksjonen av to H_2O molekyler og tre nye hydrogenatomer

³Minimums-temperaturen i forbrenningssonen er relatert til konsentrasjonen av brenselet ved nedre brenbarhetsgrense.

[33]. De nye hydrogenatomene vil fortsette reaksjonen til alt hydrogenet er brukt opp, for så til slutt å forme vann.

Kjedereaksjoner vil ikke bli diskutert nærmere. Grunnen er at ved mer komplekse brensel blir antallet reaksjoner med frie radikaler fort så stort at en mister oversikten. I eksemplet med hydrogen/oksygen-blandingen var det tre reaksjoner som beskriver kjedereaksjonene. Ved reaksjoner mellom metan og oksygen, vil antallet kjedereaksjoner overstige ett hundre. Metan er også et ukomplisert brensel [26, 33].

Ettersom kjedereaksjonene inngår i forbrenningsprosessen, medfører dette at brann-trekanten er utvidet til en brannfirkant eller en branntetraeder. Dette er gjort for å vise hvor viktig kjedereaksjonene er i en forbrenning, samt for å illustrere det teoretiske aspektet innen brannkjemi.

11.2 Forbrenning av gasser

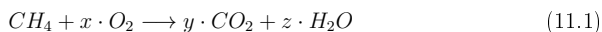
Når en gass brenner, blir det forbrukt oksygen. I de tilfellene hvor alt brensel og oksygen brukes opp, kalles reaksjonen en fullstendig forbrenning. En fullstendig reaksjon tilsier at det ikke vil være reaktanter blant sluttproduktene. I forbindelse med branner er blandingsforholdet mellom brensel og brennbaregasser som oftest slik at det oppstår en ufullstendig forbrenning, dvs. at det er uforbrukte reaktanter i sluttproduktene.

Det er to situasjoner som oppstår når luft-gassblandingen ikke er ideell og det oppstår en ufullstendig forbrenning. I den ene situasjonen er det ikke tilstrekkelig brensel til å forbruke all oksygenet, og denne type blandingsforhold kalles brenselfattig. I den andre situasjonen er det for mye brensel, slik at det er et underskudd på oksygen. Dette blandingsforholdet kalles brenselfrikt eller fet blanding.

For å illustrere de tre blandingsforhold, kan en se på tre forskjellige blandinger av metan og oksygen.

11.2.1 Fullstendig forbrenning

I den første blandingen reagerer metan (CH_4) fullstendig med oksygen og former vann og karbondioksid. Ved fullstendige forbrenninger av hydrokarboner er H_2O og CO_2 de eneste produktene av reaksjonen [26]. Den støkiometriske⁴ reaksjonsligningen er vist i ligningene nedenfor.



En fullstendig forbrenning medfører at x , y og z kan bestemmes. Den balanserte

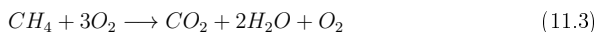
⁴Når en blanding forbrenner fullstendig, kalles blandingen en støkiometrisk blanding

ligningen blir da som følger:

$$\begin{aligned}
 y &= 1 \\
 2z &= 4 \quad \longrightarrow \quad z = 2 \\
 2x &= 2y + z \\
 x &= \frac{2 \cdot 1 + 2}{2} = 2 \\
 CH_4 + 2O_2 &\longrightarrow CO_2 + 2H_2O
 \end{aligned} \tag{11.2}$$

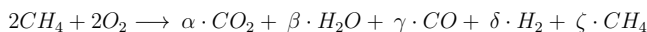
11.2.2 Brenselsfattig

I den andre blandingen er det et underskudd på brensel, dvs. brenselsfattig⁵. Dette blandingsforholdet tilsier at det vil være oksygen blant forbrenningens sluttprodukt. I reaksjonen mellom 1 mol metan (CH_4) og 3 mol oksygen (O_2) er ikke alt oksygenet forbrukt, se ligning 11.3.



11.2.3 Brenselsrik

I den tredje blandingen vil det være mer brensel enn det som kan reagere fullstendig med oksygen⁶. Dersom 2 mol metan reagerer med 2 mol oksygen oppstår det en situasjon som ikke kan løses ut i fra en støkiometrisk beregning. Grunnen er at det ikke uten videre kan fastslås hvilke produkter som produseres.



Det er fullt mulig å bruke empiriske data⁷ for å bestemme typene og mengdene av produktene. Vanskene ved bruk av slike data, er at det må foreligge informasjon om hvilke forhold brenselet er testet under og at dette er forenlig med det virkelige scenarioet. Forhold som stråling, turbulens og blandingsforholdet mellom luft og gass, vil påvirke produksjonen av forbrenningsproduktene.

Eksempel 11.1

Hvor mange mol O_2 blir forbrukt ved en fullstendig forbrenning av propan (C_3H_8)?

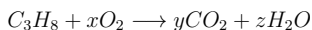
⁵Når mengden brensel er styrende eller dimensjonerende for reaksjonene, blir brannen kalt brenselskontrollert.

⁶Når mengden oksygen er styrende eller dimensjonerende for reaksjonene, blir brannen kalt ventilasjonskontrollert.

⁷Empiriske data er funnet via eksperimentelle forsøk.

Løsning:

En begynner med å sette opp den kjemiske reaksjonsligningen.



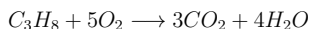
$$y = 3$$

$$2z = 8$$

$$z = 4$$

$$2x = 2y + z$$

$$x = \frac{2 \cdot 3 + 4}{2} = 5$$



Det blir forbrukt 5 mol O_2 pr forbrent mol propan.

Eksempel 11.2

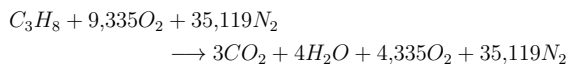
I en propan/luft-blanding er det 2,2 % propan. Sett opp reaksjonsligningen for forbrenningsreaksjonen.

Løsning:

Det blir forventet et overskudd på oksygen. Oppsettet på den kjemiske reaksjonsligningen blir da:

$$\begin{aligned} 0,022C_3H_8 + 0,978(0,21O_2 + 0,79N_2) \\ \longrightarrow xCO_2 + yH_2O + zO_2 + \chi N_2 \\ x = 0,022 \cdot 3 = 0,066 \\ 2y = 0,022 \cdot 8 \\ y = 0,088 \\ 2z + 2x + y = 0,978 \cdot 0,21 \cdot 2 \\ z = \frac{0,41076 - 0,132 - 0,088}{2} = 0,09538 \end{aligned}$$

Ligningen kan settes opp med de verdiene som er funnet for x , y og z , men det er mer praktisk å dele faktorene med brenselfraksjonen i blandingen. Ligningen deles med 0,022 og viser reaksjonen med hensyn til et mol propan.



Nitrogen i luft bidrar ikke i reaksjonene. Antall mol nitrogen vil derfor være det samme på reaktant- og produktsidene. Nitrogen opptar varme som produseres og dette vil igjen påvirke flammemetemperaturen til forbrenningen.

11.3 Energiproduksjon

Når det foregår en forbrenningsprosess, vil det bli produsert en vis energimengde pr. tidsenhet (\dot{q}). Forskjellige materialer vil avgi forskjellig mengde energi ved forbrenning. Hvor mye energi som blir avgitt er avhengig av materialets effektive forbrenningsvarme (ΔH_C), hvor mye materiale som blir forbrukt (\dot{m}), samt forbrenningseffektiviteten (χ), se ligning 11.4.

$$\dot{q} = \chi \cdot \dot{m} \cdot \Delta H_C \quad (11.4)$$

11.3.1 Forbrenningsvarme ΔH_C

Forbrenningsvarme beskriver hvor mye energi (q) som blir frigitt ved en forbrenningsreaksjon av en gitt mengde brensel. Tidligere var det vanlig å beregne forbrenningsvarmen (ΔH_C) ved bruk av formasjonsvarme (ΔH_f). Forbrenningsvarmen er lik summen av formasjonsvarmen til produktene minus formasjonsvarmen til reaktantene dividert med antall mol brensel (se ligning 11.6, og del-kapittel 11.3.2) [38]. Nyere forskning viser at forbrenningsvarmen kan bestemmes ved å se på oksygenforbruket ved en forbrenning, se ligning 11.7 og del-kapittel 11.3.3.

$$\Delta H_C = \frac{q}{n_{\text{brensel}}} \quad (11.5)$$

$$= \frac{\sum \Delta H_{f,\text{Produkt}} - \sum \Delta H_{f,\text{Reaktanter}}}{n_{\text{brensel}}} \quad (11.6)$$

$$= \frac{m_{O_2} \cdot (-13.1 \text{ kJ/g})}{m_{\text{brensel}}} \quad (11.7)$$

Forbrenningsvarmen til noen stoffer er oppgitt i tabell 11.1 og appendiks C.1. Det er viktig å legge merke til at tabell 11.1 bryter med notasjonen innen termodynamikk ved at tall som er positive angir at det er avgitt energi. Se eksemplene i del-kapittel 11.3.2 hvor formasjonsvarme (ΔH_f) brukes til å beregne forbrenningsvarmen (ΔH_C).

11.3.2 Formasjonsvarme ΔH_f

Formasjonsvarme ΔH_f er definert som endring i entalpi når et stoff er laget av opprinnelige elementer ved standard tilstanden⁸ [26]. Entalpi er summen av endring i indre energi (ΔU) og produktet av trykk og volumendring ($p \cdot \Delta V$), se ligning 11.8 [73]. Et eksempel kan være karbondioksid som produseres av karbon (C) og oksygen (O_2). Ved en forbrenning under konstant trykk, vil gassene som påvirkes få en forandring i entalpien (ΔH). Fra den ideelle gassloven kan det utledes at dersom det er en temperaturøkning i et system med konstant trykk, vil gassene øke i volum. Dermed vil det både være en økning i den interne energien (ΔU) hos gassene og en volumøkning (ΔV) når det er en økning i entalpien for systemet.

⁸I Norge er standard tilstand ofte oppgitt til 20°C og 1 atmosfærisk trykk, men siden mye av brannlitteraturen er hentet fra USA kan ofte standard tilstanden vise til 25°C og 1 atmosfærisk trykk. I praksis har dette liten effekt på beregninger og resultat.

Tabell 11.1: Forbrenningsvarme ΔH_c ved 298 K ^(†) ^(‡).

Materiale	Kjemisk formel	ΔH_C (kJ/mol)	ΔH_C (kJ/g)	ΔH_C [kJ/g(O ₂)]	ΔH_C [kJ/g(Luft)]
Karbonmonoksid	CO	283	10,10	17,69	4,10
Metan	CH ₄	800	50,00	12,54	2,91
Etan	C ₂ H ₆	1423	47,45	11,21	2,96
Eten	C ₂ H ₄	1411	50,53	14,74	3,42
Etyn	C ₂ H ₂	1253	48,20	15,73	3,65
Propan	C ₃ H ₈	2044	46,45	12,80	2,97
n-Butan	n-C ₄ H ₁₀	2650	45,69	12,80	2,97
Heptan	C ₇ H ₁₆	4464	44,7	12,7	2,96
Metanol	CH ₃ OH	635	19,83	13,22	3,07
Etanol	C ₂ H ₅ OH	1232	26,78	12,88	2,99
Cellulose		-	16,09	13,59	3,15
Tre					
(European Beech)		-	19,5	-	-
Ull		-	20,5	-	-
Polyvinylklorid		-	16,43	12,84	2,98
Polymetylmetacryl (PMMA)		-	24,89	12,98	3,01

^(†) Positive tall tilsier at materialet avgir energi ved forbrenning.

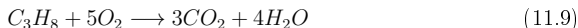
^(‡) Med unntak av de faste stoffene, er alle materialene i gassform.

For å finne formasjonsvarmen for en gass, må forandringen i både indre energi (ΔU) og volumendringen (ΔV) bestemmes [26, 94]:

$$\Delta H = \Delta U + p \cdot \Delta V \quad (11.8)$$

Det er ikke utviklet et måleinstrument som finner både energiforandringen og volumendringen. Apparatet som blir brukt til å finne entalpien, har et konstant volum og kalles en oksygenbombe. Fordi volumet er konstant vil energien som produseres kun brukes til å øke den indre energien i gassene som produseres ved forbrenningen.

Unøyaktigheten i entalpien p.g.a. utelatelsen av $p \cdot \Delta V$ er svært liten [26]. Som et eksempel kan den ideelle gassloven brukes for å vise unøyaktigheten ved forbrenningen av ett mol av propan. Det tas utgangspunkt i den kjemiske reaksjonsligningen 11.9 og den ideelle gassloven i ligning 11.10.



$$p \cdot \Delta V = \Delta nRT \quad (11.10)$$

På venstre side av reaksjonsligningen er det 6 mol med reaktanter og på høyre side av reaksjonsligningen er det 7 mol med produkter. Forskjellen (Δn) er lik 1 mol. Dersom det blir antatt at reaksjonen skjer ved 20 °C, får en følgende resultat:

$$\begin{aligned} p \cdot \Delta V &= \Delta nRT \\ &= 1 \text{ mol} \cdot 8,31431 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 293\text{K} \\ &= 2477,7 \text{ J} \\ p \cdot \Delta V &= 2,5 \text{ kJ} \end{aligned}$$

For et mol propan er unøyaktigheten på 2,5 kJ, noe som utgjør 2,4% av entalpien⁹. Innen brannteknikk opereres det ofte med feilmarginer opptil $\pm 20\%$, dermed er unøyaktigheten for entalpien akseptabel.

Ved å bruke oksygenbomben kan formasjonsvarmen for forskjellige materialer bestemmes. Formasjonsvarmen er definert som endringen i entalpien når et materiale blir produsert fra et stoff ved normal-tilstanden. Videre er entalpien definert som null for rene stoffer i deres mest stabile tilstand ved en temperatur på 298 K og 1 atm. Dette er standard temperatur og trykk i USA. Dvs. at ΔH_f for O_2 , H_2 , N_2 og C er 0 kJ/mol [73].

⁹Unøyaktigheten er fremkommet ved å dele 2,5 kJ/mol med -103,6 kJ/mol og multiplisere med 100. Hvor formasjonsvarmen til propan er -103,6 kJ/mol.

Tabell 11.2: Formasjonsvarme ΔH_f .

Stoff	Kjemisk formel	Formasjonsvarme* ΔH_f (kJ/mol)
Metan (g)	CH ₄	-75
Etan (g)	C ₂ H ₆	-85
Propan (g)	C ₃ H ₈	-104
Butan (g)	C ₄ H ₁₀	-126
Pentan (l)	C ₅ H ₁₂	-173
Hexan (l)	C ₆ H ₁₄	-199
Heptan (l)	C ₇ H ₁₆	-225
Octan (l)	C ₈ H ₁₈	-247
Nonan (l)	C ₉ H ₂₀	-272
Dekan (l)	C ₁₀ H ₂₂	-297
Eten (g)	C ₂ H ₄	52
Propen (g)	C ₃ H ₆	20
Etyn (g)	C ₂ H ₂	228
Propyn (g)	C ₃ H ₄	185
Benzen (l)	C ₆ H ₆	50
Toluen (l)	C ₇ H ₈	13
Metanol (l)	C ₁ H ₃ OH	-239
Etanol (l)	C ₂ H ₅ OH	-278
1-Butanol (l)	C ₄ H ₉ OH	-325
Karbonmonoksid (g)	CO	-110,53
Karbondioksid (g)	CO ₂	-393,52
Vann (l)	H ₂ O(l)	-285,8
Vanndamp (g)	H ₂ O(g)	-241,83

* For væsker (*l*) består formasjonsvarmen både av formasjonsvarme (ΔH_f) og fordampningsvarme (ΔH_{vap}).

Eksempel 11.3

Når karbon og oksygen forbrennes i en oksygenbombe, vil det bli produsert 393,5 kJ med energi for hvert mol CO_2 som produseres [26].

$$\begin{aligned}\Delta H_{f,298,(\text{CO}_2)} &= \frac{q}{n} \\ &= \frac{-393,5 \text{ kJ}}{1 \text{ mol}} \\ \Delta H_{f,298,(\text{CO}_2)} &= -393,5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\end{aligned}$$

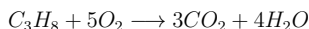
Minustegnet indikerer at energien er avgitt. Det at energi er avgitt, betyr også at karbondioksid er et mer stabilt kjemisk materiale enn karbon og oksygen hver for seg.

Eksempel 11.4

Bestem forbrenningsvarmen (ΔH_C) for propan ved å bruke formasjonsvarme.

Løsning:

Reaksjonsligningen er som følger:



Ved å bruke formasjonsvarmen til de kjemiske stoffene, kan ΔH_C bestemmes, se tabell 11.1.

$$\begin{aligned}H_{f,298,(\text{C}_3\text{H}_8)} &= -103,6 \text{ kJ/mol} \\ H_{f,298,(\text{O}_2)} &= 0 \text{ kJ/mol (pr. definisjon)} \\ H_{f,298,(\text{CO}_2)} &= -393,5 \text{ kJ/mol} \\ H_{f,298,(\text{H}_2\text{O})} &= -241,8 \text{ kJ/mol} \\ \Delta H_{C,Propan} &= \frac{\sum \Delta H_{f,Produkt} - \sum \Delta H_{f,Reaktanter}}{n_{\text{Brensel}}} \\ &= (3 \text{ mol} \cdot \Delta H_{f,\text{CO}_2} + 4 \text{ mol} \cdot \Delta H_{f,\text{H}_2\text{O}} \\ &\quad - 1 \text{ mol} \cdot \Delta H_{f,\text{C}_3\text{H}_8} - 5 \text{ mol} \cdot \Delta H_{f,\text{O}_2})/1 \text{ mol} \\ &= 3 \cdot (-393,5 \text{ kJ/mol}) + 4 \cdot (-241,8 \text{ kJ/mol}) \\ &\quad - (-103,6 \text{ kJ/mol}) \\ \Delta H_{C,Propan} &= -2044,1 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

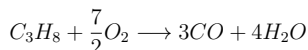
For hvert mol propan som brenner blir det produsert energi som tilsvarer 2044,1 kJ. Forbrenningsvarmen (ΔH_C) til propan blir da -2044,1 kJ/mol.

Eksempel 11.5

Bestem forbrenningsvarmen (ΔH_C) for en ufullstendig forbrenning av propan hvor det blir produsert karbonmonoksid (CO) istedenfor karbondioksid (CO_2).

Løsning:

Reaksjonsligningen er som følger:



Ved å bruke formasjonsvarmen til de kjemiske stoffene, kan ΔH_C bestemmes.

$$H_{f,298,(\text{C}_3\text{H}_8)} = -103,6 \text{ kJ/mol}$$

$$H_{f,298,(\text{O}_2)} = 0 \text{ kJ/mol (pr. definisjon)}$$

$$H_{f,298,(\text{CO})} = -110,5 \text{ kJ/mol}$$

$$H_{f,298,(\text{H}_2\text{O})} = -241,8 \text{ kJ/mol}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{C, \text{Propan}} &= \frac{\sum \Delta H_{f, \text{Produkt}} - \sum \Delta H_{f, \text{Reaktanter}}}{n_{\text{Brensel}}} \\ &= (3 \text{ mol} \cdot \Delta H_{f, \text{CO}} + 4 \text{ mol} \cdot \Delta H_{f, \text{H}_2\text{O}} \\ &\quad - 1 \text{ mol} \cdot \Delta H_{f, \text{C}_3\text{H}_8} - \frac{7}{2} \text{ mol} \cdot \Delta H_{f, \text{O}_2}) / 1 \text{ mol} \\ &= 3 \cdot (-110,5 \text{ kJ/mol}) + 4 \cdot (-241,8 \text{ kJ/mol}) \\ &\quad - (-103,6 \text{ kJ/mol}) \\ \Delta H_{C, \text{Propan}} &= -1195,1 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

P.g.a. den ufullstendige forbrenningen er forbrenningsvarmen (ΔH_C) til propan redusert til -1195,1 kJ/mol.

11.3.3 Forbrenningsvarme ΔH_C fra kalorimetri

Dersom det er flere reaktanter og produkter i en forbrenningsprosess, kan det være svært vanskelig og tidkrevende å regne ut forbrenningsvarmen til materialene som brenner. I denne forbindelsen er det utført en rekke studier for å bestemme en enklere metode for å finne forbrenningsvarmen. Metoden som benyttes mye i dag er kalorimetri. Denne metoden benytter forhold mellom forbrukt oksygen og produsert energimengde for å finne forbrenningsvarmen til en reaksjon.

For rent oksygen er det funnet at for hvert gram oksygen som er brukt i en reaksjon, er det produsert energi som tilsvarer 13,1 kJ. $\Delta H_{C, \text{O}_2}$ er da lik -13,1 kJ/g oksygen. Et lignende forhold er funnet for luft, hvor $\Delta H_{C, \text{Luft}}$ er da lik -3 kJ/g luft [26].

Eksempel 11.6

Når propan brenner forbrukes det 23,8 mol luft pr. mol forbrent propan. Hvor mye energi produseres det pr. mol propan som forbrennes?

Løsning:

For hvert gram luft som forbrukes i forbrenningen, produseres det 3 kJ med energi. For å bestemme $\Delta H_{C, \text{Propan}}$ må massen til 23,8 mol luft beregnes.

1 mol luft består av 21 % oksygen og 79 % nitrogen. Videre er molmassene til oksygen 32 gram og nitrogen 28 gram.

$$\begin{aligned} M_{\text{Luft}} &= 0,21 M_{\text{O}_2} + 0,79 M_{\text{N}_2} \\ &= 0,21 \cdot 32 \text{ g/mol} + 0,79 \cdot 28 \text{ g/mol} \\ &= 28,84 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

Massen til 23,8 mol blir da:

$$\begin{aligned} m_{\text{Total}} &= 23,8 \text{ mol} \cdot M_{\text{Luft}} \\ &= 23,8 \text{ mol} \cdot 28,84 \text{ g/mol} \\ &= 686,4 \text{ g} \end{aligned}$$

$\Delta H_{C, \text{Propan}}$ blir da lik:

$$\begin{aligned} \Delta H_{C, \text{Propan}} &= \frac{\Delta H_{C, \text{Luft}} \cdot m_{\text{Total}}}{1 \text{ mol propan}} \\ &= \frac{3 \text{ kJ/(g luft)} \cdot 686,4 \text{ g luft}}{1 \text{ mol}} \\ &= 2059,2 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

Ved den forenklede metoden ble $\Delta H_{C, \text{Luft}}$ funnet til å være -2059,4 kJ/mol. Sammenlignet med verdien funnet ved å bruke formasjonsvarme (- 2044 kJ/mol), utgjør dette en feil på mindre enn 1%.

11.3.4 Massetapsrate

Når en væske eller et fast stoff brenner, må den først omdannes til gass. Hvor mye gass som fordamper fra en væskeoverflate eller et faststoff, er avhengig av størrelsen på overflaten, væske- eller stofftypen og om væsken eller det faste stoffet blir påvirket av ekstern stråling. Massetapsraten eller fordampningsraten fra en væske eller fast stoff, kan

beregnes ved å bruke ligning 11.11. I tabell 11.3 er det oppgitt verdier for noen væsker og faste stoff.

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{q}_b'' + \dot{q}_e'' - \dot{q}_{ts}''}{L_V} \quad (11.11)$$

hvor:

\dot{m}'' er massetapsraten pr. areal ($\text{g}/\text{m}^2\text{s}$)

\dot{q}_b'' er varmestrålingsfluksen fra selve flamme (kW/m^2) (Se figur 2.2)

\dot{q}_e'' er varmestrålingsfluksen fra ekstern kilde (kW/m^2)

\dot{q}_{ts}'' er tilbakestrålingsfluksen fra brenselsoverflaten til omgivelsene (kW/m^2)

L_V er fordampningsvarmen (kJ/g)

Tabell 11.3: Verdier for massetapsrate.

Stoff	Kjemisk formel	L_V (kJ/g)	\dot{q}_b'' (kW/m ²)	\dot{q}_{ts}'' (kW/m ²)
Benzen	C ₆ H ₆	0,49	72,8	42,2
Heptan	C ₇ H ₁₆	0,48	44,3	30,5
Metanol	CH ₃ OH	1,2	38,1	22,2
Etanol	C ₂ H ₅ OH	0,97	38,9	24,7
Polyetan skum (Fleksibelt)		1,22	51,2	24,3
Polyetan skum (Hardt)		1,52	68,1	57,7
Polystyren (Hardt)		1,76	61,5	50,2
Styren		0,64	72,8	43,5

Det er også utviklet mer spesialiserte ligninger f.eks. for brennbare væsker, men de vil ikke bli diskutert her.

Eksempel 11.7

Finn massetapsraten pr. areal til heptan, når det ikke er ekstern stråling.

Løsning:

For å finne massetapsraten til heptan, kan en bruke ligning 11.11. Når det ikke er ekstern stråling, er \dot{q}_e'' lik 0 kW/m². Verdiene for \dot{q}_b'' , \dot{q}_{ts}'' og L_V er oppgitt til tabell

11.3.

$$\begin{aligned}\dot{m}'' &= \frac{\dot{q}_b'' + \dot{q}_e'' - \dot{q}_{ts}''}{L_V} \\ &= \frac{44,3 \text{ kW/m}^2 + 0 \text{ kW/m}^2 - 30,5 \text{ kW/m}^2}{0,48 \text{ kJ/g}} \\ &= 28,75 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}\end{aligned}$$

Massetapsraten pr. areal for en heptan-brann er $28,75 \text{ g}/(\text{m}^2\text{s})$.

Eksempel 11.8

Hvor stort er massetapet til en benzenbrann i løpet av 5 minutter, når det er en ekstern stråling på 25 kW/m^2 ? Brannens areal er $0,0551 \text{ m}^2$.

Løsning:

For å finne det totale massetapet for benzen, må massetapsraten først bestemmes. Massetapsraten pr. areal kan bestemmes med bruk av ligning 11.11. Verdiene for \dot{q}_b'' , \dot{q}_{ts}'' og L_V er oppgitt til tabell 11.3.

$$\begin{aligned}\dot{m}'' &= \frac{\dot{q}_b'' + \dot{q}_e'' - \dot{q}_{ts}''}{L_V} \\ &= \frac{72,8 \text{ kW/m}^2 + 25 \text{ kW/m}^2 - 42,2 \text{ kW/m}^2}{0,49 \text{ kJ/g}} \\ &= 113,47 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}\end{aligned}$$

Massetapsraten pr. areal til benzen er $113,47 \text{ g}/(\text{m}^2\text{s})$. For å finne massetapet i løpet av 5 minutter, må massetapsraten pr. areal multipliseres med både tid og areal.

$$\begin{aligned}m &= \dot{m}'' \cdot t \cdot A \\ &= 113,47 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \cdot 5 \text{ minutter} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{minutter}} \cdot 0,0551 \text{ m}^2 \\ &= 1875,7 \text{ g}\end{aligned}$$

Det totale massetapet med benzen er 1876 g .

11.3.5 Beregning av varmeproduksjon

Ved beregning av energiproduksjonen til en brann, må massetapsraten pr. areal (\dot{m}'') multipliseres med brannens areal og forbrenningsvarmen (ΔH_C) til brenselet. Videre blir det ofte i denne type beregninger inkludert en variabel for forbrenningseffektivitet (χ). Denne variabelen er viktig for materialer hvor deler av materialet forkuller eller ikke forbrenner fullstendig. For gasser er forbrenningseffektiviteten antatt å være lik 1, mens for brennbare væsker og faste stoffer er forbrenningseffektiviteten ofte 0,6 - 0,7. For brennbare væsker er det konservativt¹⁰ å sette forbrenningseffektiviteten lik 1, dvs. at all væske forbrukes. Ligningen for energiproduksjon er vist i ligning 11.12 [26].

$$\dot{q} = \chi \dot{m}'' A_b \Delta H_C \quad (11.12)$$

hvor:

\dot{q} er varmeproduksjon (kW)

χ er forbrenningseffektivitet (-)

\dot{m}'' er massetapsraten pr. areal¹¹ (g/m²s).

A_b er brannens areal (m²)

ΔH_C er forbrenningsvarmen til brenselet (kJ/g)

Eksempel 11.9

Finn varmeproduksjonen til en heptanbrann med en diameter på 1,2 meter. Anta at brenselet ikke blir påvirket av ekstern stråling.

Løsning:

For å finne varmeproduksjonen må det foreligge opplysninger om massetapsraten for heptan, samt arealet til brannen. I et tidligere eksempel ble massetapsraten pr. areal for heptan beregnet til 28,75 g/(m²s). Videre kan arealet beregnes med hensyn til diameteren D. χ er antatt å være 1. Forbrenningsvarmen (ΔH_C) er 44,6 kJ/g og er hentet fra Tabell C.1.

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \chi \cdot \dot{m}'' \cdot A_b \cdot \Delta H_C \\ &= 1 \cdot 28,75 \text{ g}/(\text{m}^2\text{s}) \cdot \pi \cdot \frac{(1,2 \text{ m})^2}{4} \cdot 44,6 \text{ kJ/g} \\ &= 1449,5 \text{ kW} \end{aligned}$$

Varmeproduksjonen for denne brannen er 1450 kW.

¹⁰Konservativt henspeler på å velge det scenarioet som gir den mest ekstreme situasjonen. Dette gjøres for å være på den sikre siden i forbindelse med branntekniske beregninger.

¹¹Massetapsraten blir også omtalt som fordampningsraten.

Eksempel 11.10

Finn varmeproduksjonen til en benzenbrann med areal 0,0551 m².

Løsning:

For å finne varmeproduksjonen, må det foreligge informasjon om massetapsraten til benzen. I et tidligere eksempel ble massetapsraten pr. areal for benzen funnet til å være 113,47 g/(m²s). Videre blir det antatt at χ er lik 1. Forbrenningsvarmen (ΔH_C) er 40,2 kJ/g og er hentet fra Tabell C.1. Varmeproduksjonen blir da:

$$\begin{aligned}\dot{q} &= \chi \cdot \dot{m}'' \cdot A_b \cdot \Delta H_C \\ &= 1 \cdot 113,47 \text{ g/(m}^2\text{s)} \cdot 0,0551 \text{ m}^2 \cdot 40,2 \text{ kJ/g} \\ &= 251,3 \text{ kW}\end{aligned}$$

Varmeproduksjonen for denne brannen er 251 kW.

11.4 Brennbarhetsgrense

Brenselet som inngår i en brann er som tidligere nevnt brennbare gasser [26]. Dersom en gass skal kunne brenne, må den være blandet med en oksidant som for eksempel oksygen i luft. Blandingsforholdet mellom brenselet og oksidanten¹² må være slik at blandingen kan antennes og opprettholde forbrenningen. Dette tilsier at ikke alle blandinger av brennbare gasser og oksidanter brenner [26]. I den videre diskusjonen vil det bli antatt at oksidanten er oksygen.

Forsøk har vist at brennbare blandinger kun vil brenne dersom blandingsforholdet ligger mellom et øvre og nedre blandingsforhold, også omtalt som øvre og nedre brennbarhetsgrense [97]. Brennbarhetsgrensene vil variere avhengig av gasstype. Videre er brennbarhetsgrensene avhengige av både blandingens temperatur og trykk.

I denne forbindelse er det viktig å avklare begrepsapparatet. I Norge brukes ofte begrepet eksplosjonsgrenser¹³. Dette er uheldig fordi ubrennbare blandinger av brensel og oksygen ved normale temperatur (20 °C) og trykk (1 atmosfære) kan antenne, brenne og eksplodere under andre trykk- og temperaturforhold. En eksplosjon kan for eksempel komprimere blandingen. Denne komprimeringen kan i noen tilfeller medføre at blandingen eksploderer selv om blandingsforholdet ligger utenfor brennbarhetsgrensene som et oppgitt ved 20 °C og en atmosfæres trykk [26, 98]. I denne boken vil begrepet brennbarhetsgrense bli brukt.

¹²Oksidant: Et stoff som lett tar opp elektroner og som da blir redusert.

¹³Se www.kbt.no

11.4.1 Brennbarhetsgrenser under normale forhold

Brennbarhetsgrensene til gasser er for en stor del funnet av Zabetakis gjennom et forskningsprosjekt utført for det amerikanske US Bureau of Mines i 1965 [26, 97]. Selv om det er lenge siden forsøkene ble gjennomført, er dette den vanligste referansen for brennbarhetsgrenser. Det er også gjort lignende forsøk senere og disse forsøkene bekrefter i store trekk verdiene til Zabetakis¹⁴.

Blanding av en enkelt gass og luft

Forsøkene til Zabetakis ble gjort ved 25°C og 1 atmosfærisk trykk [97]. I forsøkene ble en enkelt gass blandet med luft med forskjellige konsentrasjoner, for så å bli testet. Det ble gjennomført forsøk på en rekke gasser. Noen av resultatene er gjengitt i tabell 11.4 [26].

Tabell 11.4: Brennbarhetsgrenser for gass [26].

Gass	Kjemisk formel	Nedre brennbarhetsgrense [Vol %]	Øvre brennbarhetsgrense [Vol %]
Metan	CH ₄	5,0	15,0
Etan	C ₂ H ₆	3,0	12,4
Propan	C ₃ H ₈	2,1	9,5
n-Butan	C ₄ H ₁₀	1,8	8,4
n-Pentan	C ₅ H ₁₂	1,4	7,8
n-Heksan	C ₆ H ₁₄	1,2	7,4
n-Heptan	C ₇ H ₁₆	1,05	6,7
Hydrogen	H ₂	4,0	75,0

Blanding av flere gasser og luft

Det er tilfeller hvor det er flere gasser i samme blanding. For å kunne vurdere om denne type blanding er brennbar, blir Le Chateliers regel brukt [8, 26]. Denne regelen tilsier at summen av forholdene mellom konsentrasjon og nedre brennbarhetsgrense må være større enn en (1) for at blandingen skal være brennbar. En generell form av Le Chateliers regel er gitt i ligning 11.13 [8].

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{NBG}_i} \geq 1 \quad (11.13)$$

hvor:

C_i er volum-prosenten til gassen i

¹⁴Forsøksapparatet til Zabetakis er beskrevet i Drysdale's bok "An Introduction to Fire dynamics"[26].

NBG_i er nedre brennbarhetsgrense for gassen i

Dersom gassblandingen er funnet til å være brennbar, kan den nedre brennbarhetsgrensen til gassblandingen bestemmes ved å ta den inverse av tallet funnet i Le Chateliers regel for så å multiplisere med 100. Dette er vist i ligning 11.14.

$$\text{NBG}_{\text{Blanding}} = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{NBG}_i}} \quad (11.14)$$

Ligning 11.14 kan brukes for å vurdere hvorvidt det er fare for brann ved utslipp av gass i rom o.l.

Eksempel 11.11

Finn brennbarhetsgrensene til n-Pentan.

Løsning:

Brennbarhetsgrensene til n-Pentan er oppgitt i tabell 11.4 til følgende:

$$\text{NBG} = 1,4 \% \text{ og } \text{ØBG} = 7,8 \%$$

Eksempel 11.12

Finn den nedre brennbarhetsgrensen til en gassblanding som inneholder 70 % propan og 30 % n-butan.

Løsning:

Brennbarhetsgrensene og konsentrasjonene for propan og n-butan, er oppsummert i tabell 11.5.

Tabell 11.5: Konsentrasjon og brennbarhetsgrenser

Gass	% andel	NBG
Propan	70	2,1
n-Butan	30	1,8

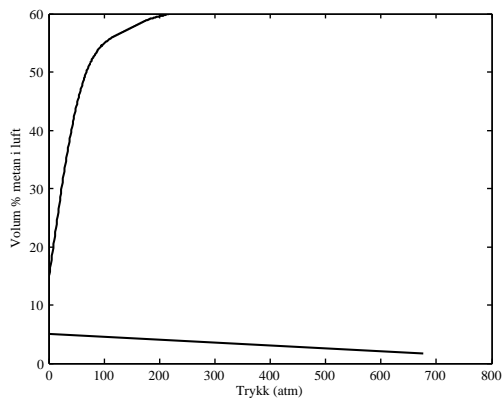
Den nedre brennbarhetsgrense for blandingen kan da beregnes fra følgende ligning:

$$\begin{aligned} \text{NBG}_{\text{Blanding}} &= \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{NBG}_i}} \\ &= \frac{100}{\frac{70}{2,1} + \frac{30}{1,8}} \\ &= 2 \% \end{aligned}$$

Den nedre brennbarhetsgrensen for blandingen av propan og n-butan er beregnet til 2 %.

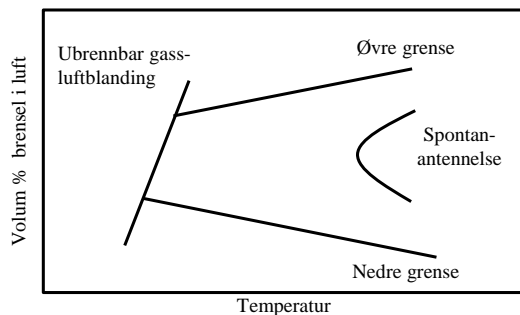
11.4.2 Brennbarhetsgrenser ved elevert temperatur og trykk

Brennbarhetsgrensene er avhengig av både temperatur og trykk. Dette er et viktig forhold fordi en brann kan øke både temperaturen og trykket i et rom. Den nedre brennbarhetsgrensen påvirkes i liten grad av endringer i trykket, men den øvre brennbarhetsgrensen kan i mye større grad endres som følge av trykkendringer [8].



Figur 11.5: Trykkpåvirkning av brennbarhetsgrenser

Det er derimot funnet at både øvre og nedre brennbarhetsgrense endres som følge av temperaturendringer. Videre er det funnet at endringene i liten grad er avhengig av gasstype [8]. For å finne endringen i brennbarhetsgrensene som følge av endring i



Figur 11.6: Temperaturpåvirkning av brennbarhetsgrenser

temperatur, blir det tatt utgangspunkt i gassens entalpi¹⁵ [8, 26], se ligning 11.15.

$$n_B \cdot \Delta H_C = \int_T^{T_G} n c_P dT \quad (11.15)$$

hvor:

n_B er antall mol av reaktantene eller brenselet.

n er antall mol av sluttproduktene.

ΔH_C er forbrenningsvarme eller entalpi.

T_G er den begrensende flammetemperaturen. Dette vil i praksis si den adiabatisk flammtemperaturen ved nedre brennbarhetsgrense.

T er reaktantenes temperatur før forbrenning, se i avsnittet nedenfor.

c_P er spesifikk varmekapasitet for sluttproduktene

Det er viktig å se at brennbarhetsgrensene er funnet ved 25°C. Dette har sammenheng med at brennbarhetsgrensene er eksperimentelt bestemt i USA, hvor standard temperaturen er 25°C. ΔH_C er forbrenningsvarmen¹⁶ til gassen. I ligningene 11.17 og 11.18 er ligning 11.16 integrert opp med hensyn på gasstemperaturer på henholdsvis 25°C og den temperaturen (T) som skal undersøkes. I ligningene 11.16 - 11.18 blir det antatt at den

¹⁵Entalpi beskriver hvor mye energi som blir frigitt når et materiale forbrenner (ΔH_C). Energien som blir frigitt brukes til å varme opp sluttproduktene fra reaksjonen, samt øke volumet som produktene opptar.

¹⁶Forbrenningsvarme er energien som blir frigitt ved forbrenning av en gass, se avsnitt 11.3.1.

spesifikke varmekapasiteten ikke er temperaturavhengig [8].

$$\frac{\text{NBG}_{25}}{100} \cdot \Delta H_C = \int_{25^\circ\text{C}}^{T_G} n_{CP} dT \quad (11.16)$$

$$\frac{\text{NBG}_{25}}{100} \cdot \Delta H_C = n_{CP}(T_G - 25^\circ\text{C}) \quad (11.17)$$

$$\frac{\text{NBG}_T}{100} \cdot \Delta H_C = n_{CP}(T_G - T) \quad (11.18)$$

Ved å dele ligning 11.18 med 11.17, kan det utvikles et uttrykk for nedre brennbarhetsgrense ved den temperaturen som er av interesse.

$$\frac{\text{NBG}_T}{\text{NBG}_{25}} = \frac{T_G - T}{T_G - 25^\circ\text{C}} \quad (11.19)$$

$$\frac{\text{NBG}_T}{\text{NBG}_{25}} = 1 - \frac{T - 25^\circ\text{C}}{T_G - 25^\circ\text{C}} \quad (11.20)$$

Brennbarhetsgrensen i ligning 11.20 er avhengig av den adiabatisk flammemetemperaturen. De fleste hydrokarbon har en adiabatisk flammemetemperatur mellom 1450 K og 1700 K (1177 °C - 1427 °C) [24]. Det er vanlig å anta en flammemetemperatur på ca. 1600 K (1327 °C) [8]. Forskning viser at en adiabatisk flammemetemperatur på rundt 1685 K eller 1411 °C gir en bedre tilnærming av de eksperimentelle dataene enn 1600 K [8, 26]. Ved å bruke flammemetemperaturen på 1411 °C, har Zabetakis utledet ligningene 11.21 og 11.22 for henholdsvis nedre og øvre brennbarhetsgrense [26].

$$\text{NBG}_T = \text{NBG}_{25}(1 - 7,21 \cdot 10^{-4}(T - 25^\circ\text{C})) \quad (11.21)$$

$$\text{ØBG}_T = \text{ØBG}_{25}(1 + 7,21 \cdot 10^{-4}(T - 25^\circ\text{C})) \quad (11.22)$$

Eksempel 11.13

Finn brennbarhetsgrensene til n-pentan ved 100 °C.

Løsning:

Brennbarhetsgrensene til n-Pentan er oppgitt i tabell 11.4 til følgende:

$$\text{NBG} = 1,4 \%$$

$$\text{ØBG} = 7,8 \%$$

For å finne brennbarhetsgrensene ved 100 °C, kan ligningene til Zabetakis benyttes:

$$\text{NBG}_T = \text{NBG}_{25}(1 - 7,21 \cdot 10^{-4}(T - 25^\circ\text{C}))$$

$$\begin{aligned} \text{NBG}_{100} &= 1,4 \% \cdot (1 - 7,21 \cdot 10^{-4}(100 - 25^\circ\text{C})) \\ &= 1,3 \% \end{aligned}$$

$$\text{ØBG}_T = \text{ØBG}_{25}(1 + 7,21 \cdot 10^{-4}(T - 25^\circ\text{C}))$$

$$\begin{aligned} \text{ØBG}_{100} &= 7,8 \% \cdot (1 + 7,21 \cdot 10^{-4}(100 - 25^\circ\text{C})) \\ &= 8,2 \% \end{aligned}$$

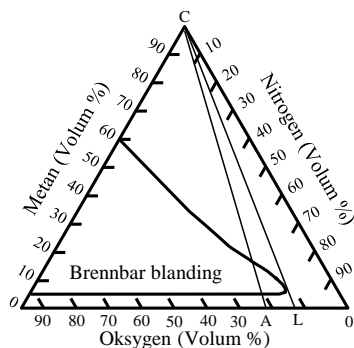
Brennbarhetsgrensene til n-pentan har endret seg til henholdsvis 1,3 og 8,2 %.

11.4.3 Brennbarhetsdiagram

Brennbarhetsgrensene som oppgis i litteraturen er utarbeidet for gasser som er blandet med luft, se tabell 11.4. Dersom konsentrasjonene av oksygen og nitrogen er forskjellig fra konsentrasjonene i luft, kan brennbarhetsgrensene i tabell 11.4 ikke benyttes. Det er derfor utviklet brennbarhetsdiagram for å bestemme om en blanding er brennbar eller ikke.

Zabetakis har utarbeidet brennbarhetsdiagram for flere gasser [97]. I denne boken vil det bli gitt en kort presentasjon av brennbarhetsdiagrammet for blandinger av metan, oksygen og nitrogen. I figur 11.7 er det skissert et trekantet brennbarhetsdiagram. Aksene i diagrammet er delt inn i volum-konsentrasjoner på ti (10) for den enkelte gassen. I tillegg er det satt av små streker på aksene som markerer i hvilken retning en strek som viser konsentrasjonen skal tegnes. Fremgangsmåten er vist i eksemplet nedenfor.

I diagrammet er det to linjer, henholdsvis: AC og LC. AC-linjen indikerer blandinger mellom metan og luft, og her finner en også igjen øvre og nedre brennbarhetsgrense for metan i luft på henholdsvis 15 og 5 volumprosent. LC-linjen tangerer brennbarhetsområdet og indikerer det minste blandingsforholdet med oksygen som gir brennbare blandinger [8, 97].



Figur 11.7: Brennbarhetsdiagram for metan

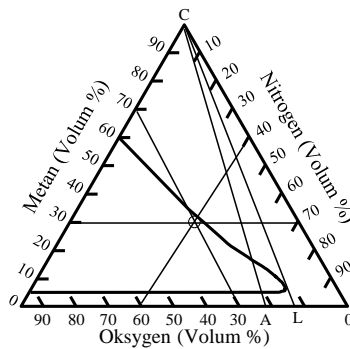
Eksempel 11.14

Bestem om en blanding av 30 % metan, 30 % oksygen og 40 % nitrogen er brennbar.

Løsning:

For å kunne finne svaret på spørsmålet, må det trekkes tre streker i brennbarhetsdiagrammet. Den første streken starter ved 30 % på metan-aksen og strekkes horisontalt over til 70 % merket på nitrogen-aksen. Dermed er det indikert at blandingen inneholder 30 % metan. Strek nummer to trekkes fra 30 % merket på oksygen-aksen og til 70 % merket på metan-aksen. Dette indikerer at det er 30 % oksygen i blandingen. Tilslutt trekkes det en strek fra 40 % merket på nitrogen-aksen til 60 % merket på oksygen-aksen. Dette tilsier at det er 40 % nitrogen i blandingen.

De tre strekene skal krysse hverandre i et punkt. Videre må det vurderes om dette punktet ligger innenfor eller utenfor det brennbare området for blandingen.



Figur 11.8: Brennbarhetsdiagram for 30 % metan, 30 % oksygen og 40 % nitrogen

Som det fremgår av diagrammet i figur 11.8, ligger blandingen i det brennbare området. D.v.s. at blandingen er brennbar.

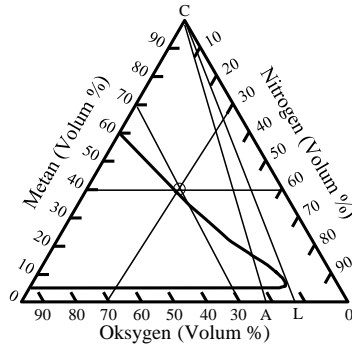
Eksempel 11.15

Bestem om en blanding av 40 % metan, 30 % oksygen og 30 % nitrogen er brennbar.

Løsning:

For å kunne finne svaret på spørsmålet, må det trekkes tre streker i brennbarhetsdiagrammet. Den første streken starter ved 40 % på metan-aksen og strekkes horisontalt over til 60 % merket på nitrogen-aksen. Dermed er det indikert at blandingen inneholder 40 % metan. Strek nummer to trekkes fra 30 % merket på oksygen-aksen og til 70 % merket på metan-aksen. Dette indikerer at det er 30 % oksygen i blandingen. Tilslutt trekkes det en strek fra 30 % merket på nitrogen-aksen til 70 % merket på oksygen-aksen. Dette tilsier at det er 30 % nitrogen i blandingen.

De tre strekene skal krysse hverandre i et punkt. Videre må det vurderes om dette punktet ligger innenfor eller utenfor det brennbare området for blandingen.



Figur 11.9: Brennbarhetsdiagram for 40 % metan, 30 % oksygen og 30 % nitrogen

Som det fremgår av diagrammet i figur 11.9, ligger blandingen utenfor det brennbare området. D.v.s. at blandingen er ikke brennbar. Men her må det vektlegges at konsentrasjonen av gassene ikke alltid er homogen. Det kan være områder hvor blandingsforholdet er slik at blandingen er brennbar.

Kapittel 12

Flammer og flammetemperatur

Det eksisterer to typer flammer: forblandet og diffusjonsflamme. Den primære forskjellen mellom de to flammetyperne gjenspeiles i hvordan brensel og oksygen blandes i forbrenningssonen.

I forblandete flammer blir oksygen og brensel blandet før den brennbare blandingen introduseres i forbrenningssonen [26]. For diffusjonsflammen skjer blandingen av brensel og oksygen i selve forbrenningssonen. Selv om dette kan virke som en liten forskjell, har forskjellen en markant påvirkning av varmestråling, forbrenningsprodukt og oppbygging av flammene.

Ved vanlig forekommende branner er det vanligst å støte på diffusjonsflammer. Men i forbindelse med backdraft og eksplosjoner, vil det være situasjoner hvor brensel og oksygen er blandet idet flammefronten beveger seg gjennom blandingen.

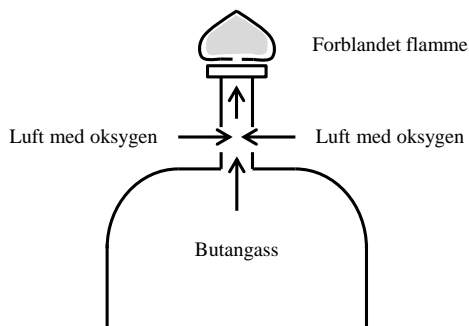
12.1 Forblandet flamme

Flammer hvor brensel og oksygen blandes før forbrenningssonen, omtales som forblandete flammer [26, 39]. Forblandete flammer benyttes i forbindelse med brennere som for eksempel butan-brennere¹ (se figur 12.1) og sveiseflammer. Denne type flamme kan også oppstå i situasjoner hvor brenselet slippes ut i et område og blandes med luft. En tennkilde blir først introdusert etter at brenselet og luft er blandet. Et eksempel kan være et rom hvor 9,5% metan er godt blandet med 90,5% luft. Bli blandingen antent, vil en kuleformet flammefront spre seg utover i rommet. Flammefronten vil være svakt blålig, noe som er et kjennetegn for forblandete flammer [33].

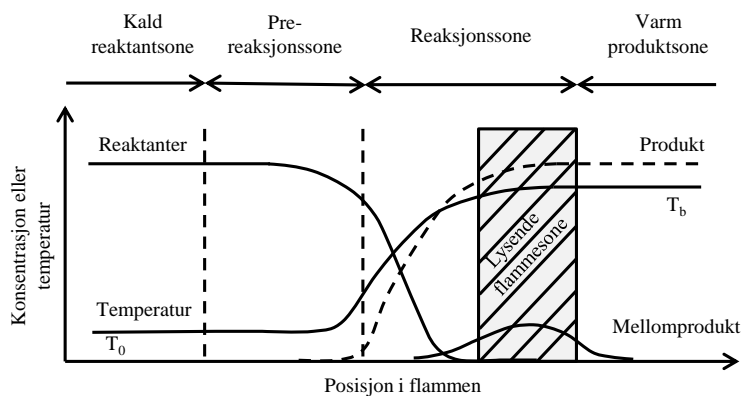
12.1.1 Oppbygging av en forblandet flamme

En forblandet flamme består av fire forskjellige soner som alle inngår i selve forbrenningssonen: kald reaktantsone, pre-reaksjonssone, reaksjonssone og varm produktsone [39]. De forskjellige sonene er skissert i figur 12.2. I den kalde reaktantsonen er temperaturen i blandingen lav. Videre består blandingen i hovedsak av reaktanter, dvs. brensel og luft. I denne sonen har ikke blandingen begynt å pyrolysere eller dekomponere, og det blir

¹Denne type gassbrenner er de fleste kjent med fra kjemilaboratorier, speiderturer o.l.



Figur 12.1: Illustrasjon av prinsippet for en butanbrenner.



Figur 12.2: Illustrasjon av sonene i en forblandet flamme [39].

derfor ikke produsert energi som kan øke temperaturen i sonen. Når blandingen beveger seg inn i pre-reaksjonssonen, vil brenselet begynne å dekomponere. Dekomponeringen produserer energi som er med på å øke temperaturen i sonen. Videre blir det produsert mellomprodukt som vil være tilstede i pre-reaksjonssonen [39].

I reaksjonssonen skjer selve forbrenningen av blandingen, og den lysende delen av forbrenningssonen vil ligge her. I denne sonen er det en markant endring av innholdet i blandingen. Fraksjonen av reaktantene går mot null, mens produktfraksjonen går mot en. Videre er det en betydelig økning av temperaturen i blandingen. Temperaturøkningen skjer som en følge av energifrigjøringen fra de kjemiske reaksjonene. Den varme produktssonen markerer avslutningen på forbrenningssonen. Her består blandingen i all hovedsak av forbrenningsprodukt som CO_2 og vann. Videre er temperaturen i blandingen på sitt høyeste. Produktene vil avkjøles etter hvert som de beveger seg inn i røyksøylen [39].

12.1.2 Kjennetegn på forblandet flamme

Forblandete flammer kjennetegnes ofte av en blålig flamme. Ved forbrenning av en meget homogen blanding av brensel og oksygen vil det være liten produksjon av sot som mellomprodukt. Forskning viser at det er sot som står for størstedelen av varmestraling fra flammer samt den gule fargen som kommer fra f. eks. diffusjonsflammer [94].

Når brensel og oksygen er godt blandet, vil forbrenningshastigheten² være høy sammenlignet med en diffusjonsflamme. Videre vil forbrenningen resultere i karbondioksid (CO_2) og vann, gitt at blandingen er støkiometrisk³ eller brenselsfattig.

12.2 Diffusjonsflamme

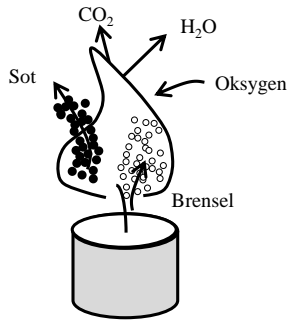
Diffusjonsflammene har en struktur og oppbygning som er forskjellig fra forblandete flammer. Forskjellene er en følge av hvordan brensel og oksygen ankommer forbrenningssonen. I en diffusjonsflamme vil ikke brenselet og oksygenet bli blandet før forbrenningssonen [39]. Dette medfører forskjeller i strålingsintensitet og produkter mellom de to flammetypene. Et eksempel kan være flammen som oppstår ved en væskebrann. Her vil væsken fordampe og brenne uten at brensel og oksygen er blandet på forhånd.

12.2.1 Oppbygging av en diffusjonsflamme

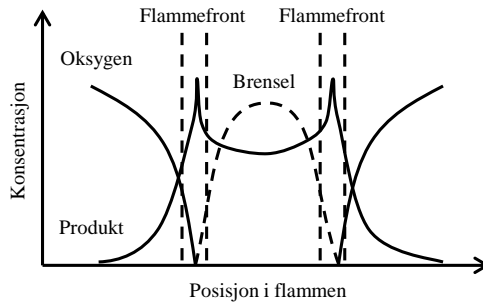
Flammesonen til en diffusjonsflamme er svært heterogen som følge av den manglende blandingen av reaktantene før selve forbrenningssonen. I figur 12.3 er det gitt en illustrasjon av en diffusjonsflamme. Selve flammen består av tre forskjellige soner: brenselssonen, forbrenningssonen og oksidantsonen (dvs. luft). Som det fremgår av illustrasjonen i figur 12.4, er det store forskjeller i gassblandingen som befinner seg i de forskjellige sonene.

²Forbrenningshastigheten tilsier hvor hurtig flammefronten beveger seg igjennom en gassblanding [28].

³Med en støkiometrisk blanding menes en ideell blanding av brensel og oksygen.



Figur 12.3: Skisse av en diffusjonsflamme.



Figur 12.4: Illustrasjon av inndelingen av flammesonen i en diffusjonsflamme.

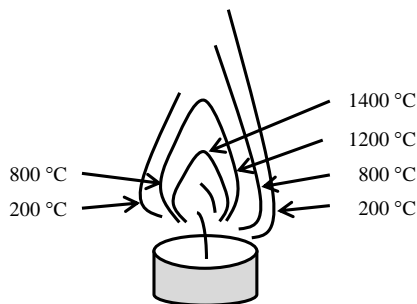
I figur 12.4 er det vist et snitt igjennom en diffusjonsflamme. Figuren viser at gassblandingen på brenselssiden i stor grad inneholder selve brenselet og dekomponerte elementer av dette. Nedbrytningen av brenselet er også betydelig før selve forbrenningssonen og dette medfører at sot blir laget i selve flammen. Sot er et av de viktigste elementene som skiller diffusjonsflammer og forblandete flammer. Det er sot som bidrar til at diffusjonsflammer avgir betydelig mer stråling enn forblandete flammer. Forsøk har vist at sot står for rundt 80% av den avgitte varmestrålingen fra en diffusjonsflamme [33].

I forbrenningssonen vil det være en meget variert blanding av oksygen, brensel, sot og forbrenningsprodukter. Bredden på selve sonen vil være avhengig av hvor turbulent flammen er, men vanligvis vil forbrenningssonen være tynn med en bredde på et par millimeter [39]. Forbrenningen i flammen er ikke momentan. Det er behov for å varme opp både brensel og oksygen før disse kan delta i forbrenningen. Denne oppvarmingen resulterer i at forbrenningssonen har en viss fysisk bredde hvor oppvarmingen skjer [39].

Blandingen i oksidantsonen er i stor grad homogen helt frem til forbrenningssonen. Dette er som følge av at gassene i denne blandingen: oksygen og nitrogen, ikke brytes ned som følge av påvirkninger fra flammen. Det er først når oksygen begynner å reagere med brenselet, at det oppstår endringer i konsentrasjonen. Reaksjonene mellom oksygen og brenselet er det som kjennetegner forbrenningssonen. Endringene i gasskonsentrasjonene er derfor små i oksidantsonen.

12.2.2 Kjennetegn på diffusjonsflamme

At flammen til en diffusjonsflamme er heterogen, bidrar til flere viktige kjennetegn ved denne type flamme. Et meget viktig kjennetegn er at temperaturen i flammen vil variere sterkt i henhold til posisjon inne i flammen. I figur 12.5 er det skissert opp hvordan temperaturen endres gjennom et snitt av flammen. Variasjonene i flammemetemperaturen er et resultat av den relativt smale forbrenningssonen i diffusjonsflammen [39]. Områdene i flammen som ikke er del av forbrenningssonen, vil derfor ha lavere temperatur enn forbrenningssonen.



Figur 12.5: Skisse av temperaturfordeling i en diffusjonsflamme [79].

Diffusjonsflammer som inneholder sotpartikler vil avgi energi via varmestråling. Denne varmestrålingen oppstår p.g.a. oppvarmingen av sotpartikler som befinner seg i flammen. Sotpartiklene er et produkt av nedbrytning av brenselet før dette kommer til forbrenningssonen. Diffusjonsflammer med hydrokarboner som brensel og med en diameter på over 1 meter, vil ha en emissivitet som er tilnærmet lik et svart legeme, dvs. lik 1 [75]. Den høye emissiviteten er et resultat av sotpartiklene i flammene fra brannen.

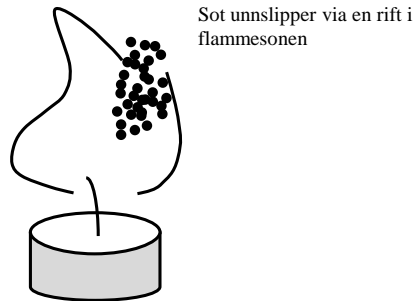
P.g.a. sotpartiklene i diffusjonsflammene, vil denne type flamme avgi mer varmestråling enn flammer uten sotpartiklene [33]. I tabell 12.1 er det oppgitt hvor mye varmestråling som blir avgitt ved bruk av forskjellig brensel. Hydrogen skiller seg klart ut fra andre typer brensel ved at det ikke inneholder karbon, og kan dermed ikke produsere sotpartikler [33].

Tabell 12.1: Andel energi som transporteres vekk fra diffusjonsflammer p.g.a. varmestråling og konveksjon [33].

Gass	Prosent av teoretisk energiproduksjon		
	Stråling	Konveksjon	Ikke frigitt
Hydrogen	9	91	0
Metan	18	81	1
Etan	20	79	1
Propan	27	68	5
Etylen	32	59	9
Propylen	39	50	11
1,3-Butadiene	43	37 - 42	15 - 20

Forbrenningsproduktene fra en diffusjonsflamme vil i stor grad være de samme som for forblandete flammer. De vanligste produktene er karbondioksid (CO_2) og vann (H_2O). Det vil allikevel være forskjeller i forbrenningsproduktene fra de to flammetyperne fordi diffusjonsflammene kun har en tynn forbrenningssone som er lett påvirkelig av turbulens i luften omkring flammen. Turbulensen i luften kan medføre at forbrenningssonen ikke er kontinuerlig rundt hele flammen (se figur 12.6). Der hvor det oppstår diskontinuitet, kan uforbrent brensel, sotpartikler og andre dekomponerte elementer fra brenselet slippe ut fra flammen [33]. Disse uforbrente elementene kan både være svært giftige, og i tilstrekkelige mengder vil de redusere sikten gjennom røyk.

Det kan være ufullstendig forbrenning i både diffusjonsflammer og forblandete flammer p.g.a. for lite oksygentilførsel til flammen. Den ufullstendige forbrenningen vil kunne føre til produksjon av karbonmonoksid (CO), i tillegg til at brensel og dekomponerte elementer av brenselet ikke forbrennes. Denne type forbrenning forekommer ofte i vanlige branner og bidrar derfor til å redusere personsikkerheten til dem som oppholder seg i bygget hvor det brenner.



Figur 12.6: Diskontinuerlig forbrenningsone.

12.3 Adiabatisk flammtemperatur

Energien fra den kjemiske reaksjonen i flammen, vil være med på å bestemme flammtemperatur. Dersom flammen blir antatt å være adiabatisk, kan den adiabatiske flammtemperatur beregnes [94]. Et adiabatisk system er et system som ikke mister energi til omgivelsen som følge av varmetap.

12.3.1 Teoretisk utledning

I et adiabatisk system vil all energi bli brukt til å øke forbrenningsproduktene temperatur [26, 94]. Ved estimering av flammtemperatur til en forblandet flamme, vil antagelsen om et adiabatisk system gi god korrelasjon mellom estimert og virkelig temperatur. Antagelsen er god fordi det blir avgitt svært lite energi som følge av varmestråling. En lignende antagelse for diffusjonsflammer vil ikke gi like gode korrelasjoner fordi 20 til 40 % av energien stråles bort (Se tabell 12.1) [26].

I ligning 12.1 er det vist hvordan all energi brukes til å øke temperaturen i produktene fra forbrenningssonen.

$$\delta q = nc_p \delta T \quad (12.1)$$

eller integrert

$$q = nc_p(T_f - T_0) \quad (12.2)$$

$$T_f = \frac{q}{nc_p} + T_0 \quad (12.3)$$

hvor:

nc_p er summen av de vektete spesifikke varmekapasitetene til forbrenningsproduktene.

T_f er den adiabatisk flammtemperatur.

T_0 er begynnelsetemperaturen. I Norge antas en temperatur på 20 °C.

\dot{q} er varmeproduksjonen, se ligning 12.4.

$$q = \chi m \Delta H_C \quad (12.4)$$

hvor:

χ er forbrenningseffektiviteten

m er forbrent masse

ΔH_C er forbrenningsvarme

Flammtemperatur er et estimat fordi:

- Systemet ikke er adiabatisk. En flamme vil stråle vekk en del av energien som produseres. Avhengig av for eksempel sotproduksjon, kan mellom 20 og 40% av energien stråles vekk fra flammen [26].
- Ved høye temperaturer vil det bli produsert en rekke forskjellige forbrenningsprodukt utover CO₂ og vann. Disse produktene er et resultat av endoterme reaksjoner. Produksjonen av denne type forbrenningsprodukt øker betydelig over 1700°C [26].
- Spesifikk varmekapasitet er avhengig av temperatur, se tabell 12.2. I denne boken vil det bli antatt en flammtemperatur på ca. 1500 Kelvin. De spesifikke varmekapasitetene vil bli relatert til denne temperaturen. Interpolering⁴ mellom verdiene gitt i tabell 12.2 vil gi bedre estimat på flammtemperatur [26].

Tabell 12.2: Spesifikk varmekapasitet for noen enkelt gasser.

Temperatur (K)	c_p (J/mol·K)				
	298	500	1000	1500	2000
CO	29,14	29,79	33,18	35,22	36,25
CO ₂	37,13	44,63	54,31	58,38	60,35
H ₂ O	33,57	35,21	41,22	47,00	51,10
N ₂	29,13	29,58	32,70	34,85	36,00
O ₂	29,37	31,09	34,88	36,56	37,78

Den adiabatisk flammtemperatur er viktig ved beregning av volum- og trykkøkninger i forbindelse med brann og eksplosjon, fordi den gir konservative beregninger [26].

⁴Det henvises til boken "Flammer og Adiabatisk Flammtemperatur" av Bjarne Christian Hagen for en mer detaljert utledning om bruk av interpolering av c_p -verdiene.

Beregninger viser at den maksimale adiabatisk flammtemperatur⁵ vil ligge mellom 2200 K og 2400 K (ca. 1930 og 2130 °C) når brenselet er blandet med luft og mellom 3000 K og 3400 K (ca. 2730 og 3130 °C) når det er blandet med oksygen [39]. I tabell 12.3 er det oppgitt adiabatisk flammtemperaturer for noen gasser.

Tabell 12.3: Adiabatisk flammtemperatur for støkiometriske blandinger [39].

Stoff	Formel	Adiabatisk flammtemperatur (K)	
		Blandet med oksygen	Blandet med luft
Hydrogen	H ₂	3083	2380
Karbonmonoksid	CO	2973	2400
Metan	CH ₄	3010	2222
Eten	C ₂ H ₄	-	2375
Etyn	C ₂ H ₂	3431	2513

12.3.2 Beregningseksempler

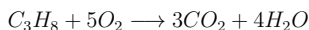
Nedenfor er det gitt to eksempler på hvordan den adiabatisk flammtemperatur kan beregnes. I eksemplene er spesifikk varmekapasitet (c_p) vurdert opp mot en flammtemperatur på 1500 K.

Eksempel 12.1

Bereg den adiabatisk flammtemperatur til propan ved forbrenning i oksygen.

Løsning:

Den kjemiske reaksjonsligningen er som følger:



Ved forbrenning av et mol propan, blir det produsert energi som tilsvarer 2044 kJ. Forbrenningsvarmen (ΔH_C) til propan er da 2044 kJ/mol. Videre er det antatt at flammtemperatur vil ligge rundt 1500 K. Verdiene for spesifikk varmekapasitet er derfor valgt for denne temperaturen.

⁵Den maksimale adiabatisk flammtemperatur vil oppnås ved en støkiometrisk blanding, dvs. fullstendig forbrenning av både brensel og oksygen.

Stoff	Antall mol (mol)	$c_{P,1500}$ (J/(K mol))	nc_P (J/K)
CO ₂	3	58,4	175,2
H ₂ O	4	47	188
Sum =			363,2

Flammtemperaturen blir da:

$$\begin{aligned}
 T_f &= T_0 + \frac{q}{nc_P} \\
 &= T_0 + \frac{n \cdot \Delta H_C}{nc_P} \\
 &= 293 \text{ K} + \frac{2044 \cdot 10^3 \text{ J}}{363,2 \text{ J/K}} \\
 &= 5921 \text{ K}
 \end{aligned}$$

Den adiabatiske flammtemperaturen til propan vil være 5921 K.

Kommentarer:

- Det ble antatt en flammtemperatur på 1500 K. I henhold til beregningen er temperaturen mye høyere. Beregningen burde vært gjentatt med nye verdier for de spesifikke varmekapasitetene.
- Beregningsmetoden tar ikke hensyn til en rekke endotermiske kjedereaksjoner som oppstår når temperaturen i forbrenningsonen overstiger 2000 K. Disse endotermiske reaksjonene vil begrense flammtemperaturen.

Eksempel 12.2

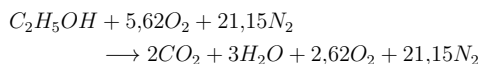
Finn flammtemperaturen ved forbrenning av en etanol/luft-blanding, som inneholder 3,6 % etanol.

Løsning:

Først må den kjemiske reaksjonsligningen bestemmes.

$$\begin{aligned}
 0,036 C_2H_5OH + 0,964(0,21O_2 + 0,79N_2) \\
 \longrightarrow xCO_2 + yH_2O + zO_2 + \chi N_2 \\
 x = 0,036 \cdot 2 = 0,072 \\
 2y = 0,036 \cdot 6 \\
 y = 0,108 \\
 2z + 2x + y = 0,964 \cdot 0,21 \cdot 2 + 0,036 \cdot 1 \\
 z = \frac{0,44088 - 0,144 - 0,108}{2} = 0,094
 \end{aligned}$$

Deler hele ligningen med 0,036 for å vise reaksjonen med hensyn til et mol etanol:



Ved forbrenning av et mol etanol, blir det produsert 1232 kJ energi. Forbrenningsvarmen (ΔH_C) til etanol er da 1232 kJ/mol. Videre er det antatt at flammtemperaturen til etanol/luft-blandingen vil ligge rundt 1500 K. Verdien for c_p er derfor valgt for denne temperaturen.

Stoff	Antall mol (mol)	$c_{P,1500}$ (J/(K mol))	nc_P (J/K)
CO ₂	2	58,4	116,8
H ₂ O	3	47	141,0
O ₂	2,62	36,6	95,9
N ₂	21,15	34,9	738,1
		Sum =	1092,0

Flammtemperaturen blir da:

$$T_f = T_0 + \frac{q}{nc_P} \\ = 293 \text{ K} + \frac{1232 \cdot 10^3 \text{ J}}{1092 \text{ J/K}} \\ = 1421 \text{ K}$$

Den adiabatisk flammtemperaturen til denne blandingen vil være 1421 K.

Kapittel 13

Antennelse

Antennelse er den første fasen i et brannforløp. For å få antennelse må det frigjøres tilstrekkelig med energi fra en kjemisk reaksjon til at reaksjonen kan fortsette uten ekstern energitilførsel. Antennelsesprosessen vil være grunnlaget for prosessene illustrert med brannfirkanten.

I dette kapitlet vil det først bli gitt en liten introduksjon i teorien om antennelse. Deretter vil en del aspekter vedr. antennelse relatert til forskjellige materialer bli presentert.

13.1 Termisk eksplosjon

Det er utviklet en rekke forskjellige måter å vurdere antenner på. De fleste tar utgangspunkt i Semenovs analyse av termiske eksplosjoner som ble gjort på slutten av 1920-tallet [66]. Semenov utførte et banebrytende arbeid som andre forskere har utviklet videre. I denne boken vil Semenovs teori¹ bli presentert fordi den gir et godt konsepsjonelt innblikk i mekanismene som styrer antennesprosessen.

Utgangspunktet for den termiske eksplosjonsteorien er en beholder hvor det er en homogen gass-blanding under uniformt² trykk. Det blir antatt at varmeproduksjonen i gassen er større enn varmetapet gjennom veggene i beholderen, se ligning 13.1 og figur 13.1.

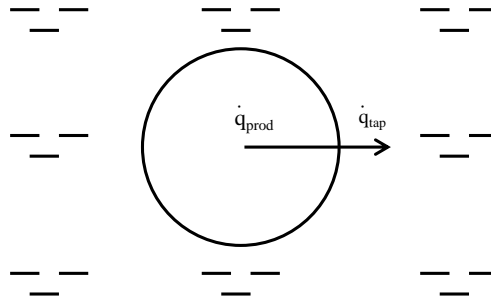
$$\dot{q}_{\text{produksjon}} > \dot{q}_{\text{tap}} \quad (13.1)$$

For å bestemme varmeproduksjonen i beholderen, må en se på de kjemiske reaksjonene som foregår i gassen i beholderen. I gassblandingen vil det foregå en kjemisk reaksjon som utvikler energi. Produksjonen av kjemiske produkter fra reaksjonen antas å kunne beskrives av Arrhenius ligning, som er gitt i ligning 13.2 [94].

$$r = -\rho A_e \cdot e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)} = -\rho A_e \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (13.2)$$

¹Teorien til Frank-Kamenetskii er oftere benyttet i forbindelse med beregninger, men konsepsjonelt er denne teorien ikke så lett tilgjengelig. Det henvises til litteratur vedr. forbrenning for mer dyptgående forklaringer på denne teorien.

²Begrepet uniformt trykk viser til at det ikke er trykkforskjeller i beholderen.



Figur 13.1: Beholder med oppvarmet innhold.

hvor:

r er produksjonsraten

ρ er tetthet

A_e er pre-eksponential-tall³

E er aktivasjonsenergi⁴

R er den universelle gasskonstant

T er temperatur

Når produksjonsraten er funnet, kan det gjøres en antagelse som tilsier at forbruk av reaktanter og produksjon av produkter er tilnærmet lik⁵. Energiproduksjonen i beholderen vil da være produktet av produksjonsraten (r) og summen av formasjonsvarmen til henholdsvis produkter og reaktanter, se ligning 13.3 og 13.4.

$$\dot{q}_{\text{prod}} = \Delta H_f \cdot r \quad (13.3)$$

$$= -(\Sigma \Delta H_{f,\text{produkt}} - \Sigma \Delta H_{f,\text{reaktant}}) \cdot \rho \cdot A_e \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (13.4)$$

hvor:

\dot{q}_{prod} er energiproduksjonen

³ A_e er en empirisk konstant som beskriver hvor ofte det er kollisjoner av molekyler i en blanding [57].

⁴ E er en empirisk konstant som beskriver hvor mye energi som må tilføres et stoff for å kunne igangsette en kjemisk reaksjon [57].

⁵Ved å sette opp en kjemisk reaksjonsligning, vil en se at antallet mol reaktanter som inngår i en kjemisk reaksjon, ofte i tallverdi er tilnærmet lik det antall mol produkter som er et resultat av reaksjonen.

ΔH_f er formasjonsvarme

$\Delta H_{f,\text{produkt}}$ er formasjonsvarmen til produktene

$\Delta H_{f,\text{reaktant}}$ er formasjonsvarmen til reaktantene

ρ er tetthet

Varmetapet fra beholderen beskrives av Newtons lov, se ligning 13.5.

$$\dot{q}_{\text{tap}} = hA(T_v - T_k) \quad (13.5)$$

hvor:

h er konveksjonsfaktoren

A er areal

T er temperatur

v henviser til den varme siden av systemet

k henviser til den kalde siden av systemet

Antennelsen vil være avhengig av en ustabilitet mellom varmeproduksjon og -tap [94], se ligning 13.6 og 13.7. Det første leddet i ligningene beskriver hvordan energinivået i det aktuelle volumet endres med temperatur og tid.

$$\rho c_p \frac{\delta T}{\delta t} = \dot{q}_{\text{produkt}} - \dot{q}_{\text{tap}} \quad (13.6)$$

$$\rho c_p \frac{\delta T}{\delta t} = (\Sigma \Delta H_{f,\text{reaktant}} - \Sigma \Delta H_{f,\text{produkt}}) \cdot \rho \cdot A_e \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_v}\right) - hA(T_v - T_k) \quad (13.7)$$

hvor:

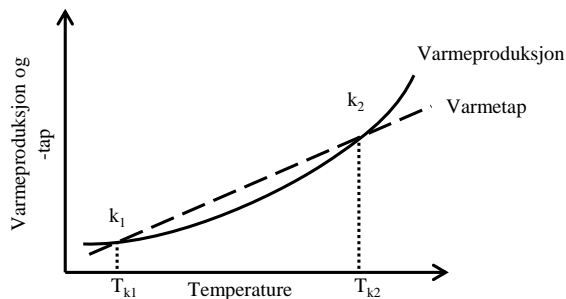
c_p er spesifikk varmekapasitet

δT er temperaturforskjell

δt er tidssteg

De andre variablene er beskrevet i ligningene ovenfor og i notasjonslisten fremst i boken.

En kvalitativ beskrivelse av antennelse kan bli gitt dersom varmeproduksjon og varmetap plottes sammen i samme plot som en funksjon av temperatur, se figur 13.2. Fra figur 13.2 og ligning 13.7 ser en at varmeproduksjonen er en eksponentialfunksjon, mens varmetapet er lineært som følge av temperaturen. Varmeproduksjonen og -tapet vil dermed endre seg forskjellig som følge av temperaturendringer. Varmeproduksjonen og



Figur 13.2: Energiproduksjon og -tap som funksjon av temperatur.

-tapet er like i de punktene hvor plottene krysser hverandre (k_1 og k_2), men endringen⁶ som følge av temperaturen er forskjellig i krysningspunktene.

Det er to krysningspunkt og disse beskriver viktige egenskaper til et system med en ustabilitet mellom varmeproduksjon og -tap. Krysningspunktet ved den laveste temperaturen $T_{k,1}$ blir omtalt som et stabilt punkt (k_1). k_1 omtales som stabilitetspunktet fordi mindre temperaturrendringer rundt $T_{k,1}$ vil resultere i at systemet vender tilbake til temperaturen $T_{k,1}$ når systemet stabiliseres. Dersom temperaturen (T) i beholderen er lavere enn $T_{k,1}$, vil varmeproduksjonen være større enn varmetapet. Dette betyr at systemet vil varmes opp til det når stabilitetspunktet k_1 . I de tilfeller temperaturen i systemet ligger mellom $T_{k,1}$ og $T_{k,2}$, vil varmetapet være dominerende og systemet vil kjøles ned til det når stabilitetspunktet k_1 [94]. Systemets egenskaper ved $T_{k,1}$ er beskrevet av ligningene 13.8 og 13.9. Ved k_1 vil varmetapet være dominerende⁷ og systemet vil ikke øke i temperatur og det vil ikke forekomme en antennelse.

$$\dot{q}_{\text{prod}} = \dot{q}_{\text{tap}} \quad (13.8)$$

$$\frac{\dot{q}_{\text{prod}}}{dT} < \frac{\dot{q}_{\text{tap}}}{dT} \quad (13.9)$$

For å få antennelse, må temperaturen i systemet være høyere enn $T_{k,2}$. I det ustabile punkt (k_2) vil varmeproduksjonen og -tapet være like store, men de deriverte vil være forskjellige. Dersom temperaturen T i systemet er større enn $T_{k,2}$ er den deriverte for varmeproduksjonen større enn for varmetapet, og temperaturen i systemet vil øke til det oppstår en antennelse [28, 94]. Se ligningene 13.10 og 13.11 og sammenlign dem med ligningene 13.8 og 13.9. Ved lavere temperaturer enn $T_{k,2}$, vil systemet avkjøles og

⁶Endringen i et punkt beskrives ved den deriverte eller stigningstallet i punktet.

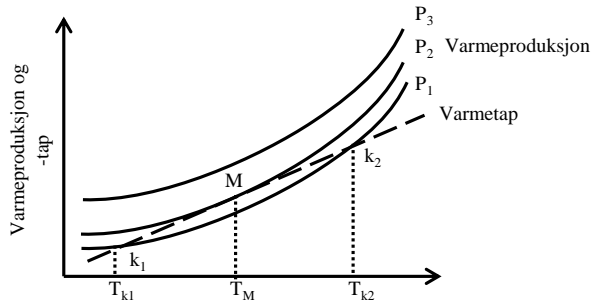
⁷Varmetapet er dominerende fordi den deriverte eller stigningstallet er større enn den deriverte for varmeproduksjonen.

stabiliseres ved k_1 .

$$\dot{q}_{\text{prod}} = \dot{q}_{\text{tap}} \quad (13.10)$$

$$\frac{\dot{q}_{\text{prod}}}{dT} > \frac{\dot{q}_{\text{tap}}}{dT} \quad (13.11)$$

I figur 13.3 er det vist to nye linjer for varmeproduksjon. Linjen markert med P_2 tangerer varmetapskurven kun i ett punkt (M). Dvs. at ved en temperatur utover T_M så vil systemet øke i temperatur og en antennelse vil oppstå. Ved lavere temperaturer enn T_M er varmeproduksjonen større enn varmetapet, og systemet vil varmes opp til det når T_M og systemet utvikler seg videre mot antennelse. Linjene P_2 og varmetap i figur 13.3 viser at det er en kritisk varmeproduksjon for systemet [94]. Større varmeproduksjoner vil resultere i øyeblikkelig antennelse. Dette er vist med linjen markert med P_3 . Denne linjen krysser ikke varmetapskurven og dette betyr at for alle opprinnelige temperaturer av systemet vil det skje en antennelse [94].



Figur 13.3: Forskjellige varmeproduksjonsrater.

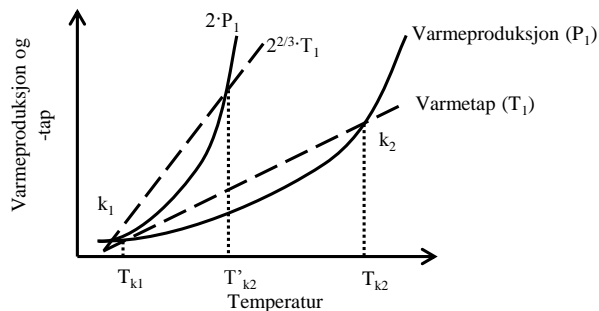
Størrelsen på det volumet hvor den kjemiske reaksjonen oppstår er også viktig. Endringer i volumet til beholderen vil resultere i endringer i beholderens overflateareal, og dette vil igjen påvirke både varmeproduksjon og -tap. En dobling av volumet til en kuleformet beholder hvor de kjemiske reaksjonene foregår, vil resultere i en endring av overflatearealet på $2^{2/3}$ [28]. Se fotnoten⁸ og figur 13.4. Dette forholdet gjør at antennelsen til systemet endres som følge av størrelsen til det oppvarmede volumet. I tabell 13.1 er det vist hvordan spontan-antennelsestemperatur til forskjellige væskedamper endres som følge av volum til testvolumet.

⁸V er volumet til en kule og r er radiusen til kulen.

$$V_1 = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad A_1 = 4\pi r^2$$

$$V_2 = 2V_1 = \frac{4}{3}\pi(2^{1/3}r)^3 \quad A_2 = 4\pi 2^{2/3}r^2$$

Forholdet mellom de to arealene er da $2^{2/3}$.



Figur 13.4: Effekten på antennestemperatur ved endring av volumet i en beholder.

Tabell 13.1: Spontan-antennestemperatur vs. volum [26]. Temperaturene til væskedampene er oppgitt i °C.

Væsker	Volum av beholder ($\text{m}^3 \cdot 10^{-6}$)				
	8	35	200	1000	1200
Dietyleter	212	197	180	170	160
Benzen	668	619	579	559	-
Metanol	498	473	441	428	386
n-Pentan	295	273	-	258	-
n-Heptan	255	248	-	223	-

Det er væskedamp/luft-blandingen som antennes i forsøkene.

Materialer kan antennes som en følge av eksterne tennkilder. Det kan også oppstå situasjoner hvor et materiale antenner uten at det er tilstede tennkilder som åpen flamme eller gnister. Det er viktig å skille mellom disse formene for antennelse når det gjelder å beskrive hvor lett antenning et materiale er.

13.2 Antennelse med tennkilde

Antennelse av gasser, væsker og faste stoffer, er viktige kjemiske reaksjoner som brukes daglig. I prinsippet er antennelse ved brann den samme som ved vanlige forbrenningsreaksjoner, men skiller seg ved at branner kommer ut av kontroll eller ikke er påtenkt. Vanlige tennkilder er åpne flammer, varme flater og gnister, enten elektriske eller mekaniske [28].

En viktig funksjon til tennkilden er at den tilfører energi til det aktuelle materialet som antennes. Energien fra tennkilden øker temperaturen til materialet, som antenner. Tennkilden vil også medføre at væsker fordampes og faste stoffer pyrolyseres, og avgir brennbare gasser. Hvor kraftig tennkilden må være for å antenne et materiale, vil avhenge sterkt av aggregattilstanden til materialet. Gasser vil kunne antenne ved energisvake gnister, mens væsker og faste stoff må ha kraftigere tennkilder som først fordampes materialet og så antenner det.

13.2.1 Antennelse av gass

Dersom en blanding av en brennbar gass og en oksidant⁹ skal kunne antenne, må blandingsforholdene mellom gassene være riktige. I tillegg til blandingsforhold vil temperatur og trykk påvirke mulighetene for en antennelse [33]. Hvor lett en gass antenner vil variere fra gasstype til gasstype, og det vil også avhenge av antennelses-formen [33].

Blandingsforholdene mellom en brennbar gass og oksygen er diskutert tidligere i kapitlet om Brannkjemi. Her ble det vist at gasser har en øvre og nedre brennbarhetsgrense, og at disse grensene varierer avhengig av gassene. Videre ble det diskutert at brennbarhetsgrensene er temperaturavhengige og i en viss grad trykkavhengige. Trykkavhengigheten er sterkere for den øvre enn for den nedre brennbarhetsgrensen.

I tillegg til at gass-konsentrasjonen må ligge mellom øvre og nedre brennbarhetsgrense, må tennkilden være kraftig nok til å starte reaksjonen og forbrenningssonen må ha mulighet til å spre seg. For gasser er det svært ofte oppgitt minste gnistenergi eller laveste overflatetemperatur for å igangsette en kjemisk reaksjon, se tabell 13.2. Videre er det oppgitt det som omtales som kvelningsavstand [28]. Dersom den brennbare blandingen befinner seg i en spalte med mindre avstand enn kvelningsavstanden, så vil varmetapet til veggene i spalten være så stort at forbrenningssonen avkjøles og flammen vil ikke kunne forplante seg videre¹⁰ [26, 28]. Figur 13.5 illustrerer prinsippet. Figuren henviser til to typer elektroder som avgir elektriske gnister: med og uten flens. I tilfellet

⁹Den vanligste oksidanten i forbindelse med brann er oksygen.

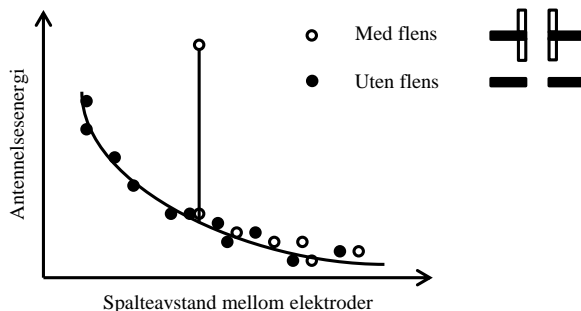
¹⁰Eckhoff og Levik påpeker at forbrenningsprosessen ikke avbrytes, men at forbrenningssonen nedkjøles. Kvelningsavstand kan dermed være misvisende, men pr. i dag er det dette ordet som er satt på det engelske begrepet: Quenching distance.

med elektroder med flens, vil det være en avstand hvor en flamme ikke vil forplante seg fordi varmetapet til flensene vil være for stort til å opprettholde flammen.

Tabell 13.2: Antennelsesvilkår for gass og væskedamp [26].

Gass eller damp	Brennbarhetsgrense		Minste antennelsesenergi [†] mJ	Minste kvelningsavstand [†] mm
	Nedre % vol	Øvre % vol		
Metan	5,0	15	0,26	2,0
Etan	3,0	12,4	0,24	1,8
Propan	2,1	9,5	0,25	1,8
n-Butan	1,8	8,4	0,26	1,8
n-Heptan	1,05	6,7	0,24	1,8
Metanol	6,7	36	0,14	1,5
Etanol	3,3	19	-	-

[†] Det hefter usikkerhet vedr. noen av disse verdiene.



Figur 13.5: Kvelningsavstand for en gass øker når elektrodene har flenser.

13.2.2 Antennelse av væske

Brennbare væsker er klassifisert i henhold til flammepunktet. Flammepunktet er definert som den laveste væsketemperaturen hvor det kan eksistere en brennbar blanding av luft og væskedamp over en væskeoverflate [26]. Det eksisterer forskjellige standarder for å finne flammepunktet til en væske. I Norge blir NS-EN ISO 13736 standarden brukt. Ved flammepunktet vil det kun være en kortvarig flamme ved antennelsen av den brennbare blandingen. Den brennbare væsken er ikke tilstrekkelig oppvarmet til å opprettholde en

kontinuerlig flamme. Dersom væsken varmes ytterligere opp, vil det ved antennelse etableres en kontinuelig flamme over væskeoverflaten. Denne høyere temperaturen defineres som antennelsestemperaturen.

For å finne flammepunktet varmes væsken opp i en lukket kopp. Ved jevne mellomrom blir en liten flamme introdusert for å se om det er dannet en brennbar gass/luft-blanding i koppen. Dersom det skjer en antennelse, er flammepunktet funnet. Videreføres testen kan antennelsestemperaturen identifiseres ved en kontinuerlig flamme. I tabell 13.3 er det oppgitt noen verdier for flammepunkt og antennelsestemperatur.

Tabell 13.3: Antennelsestemperatur og flammepunkt for brennbare væsker [26].

Brennbare væsker	Flammepunkt		Antennelsestemperatur °C
	Lukket kopp °C	Åpen kopp °C	
n-Heksan	-22	-	-
n-Oktan	-13	-	-
n-Dekan	44	52	61,5
Metanol	12	1	1
Etanol	13	6	6
n-Propanol	15	16,5	16,5
n-Heksanol	45	74	-
Aceton	-14	-9	-

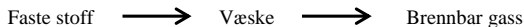
Avhengig av hvor lavt flammepunktet er for en væske, deles væsker inn i tre fareklasser i Norge. I tillegg kommer diesel og fyringsolje [54]. Klassene er som følger:

- Brannfarlig væske, kategori 1: Væske med flammepunkt < 23 °C og kokepunkt ≤ 35 °C.
- Brannfarlig væske, kategori 2: Væske med flammepunkt < 23 °C og kokepunkt > 35 °C.
- Brannfarlig væske, kategori 3: Væske med flammepunkt ≥ 23 °C og ≤ 60 °C.
- Diesel og fyringsoljer: Gassolje, diesel og lett fyringsolje med flammepunkt ≥ 60 °C og ≤ 100 °C.

Inndeling i fareklasser varierer fra land til land og det har vært lite standardisering så langt. FN jobber nå med å innføre standardiserte fareklasser for gasser, væsker og faste stoffer.

13.2.3 Antennelse av fast stoff

Antennelse av faste stoff er den antennelsesprosessen som krever mest energi. Faste stoff må brytes ned slik at det blir produsert brennbar gass i store nok mengder til å resultere



Figur 13.6: Nedbrytning av faste stoff.

i antennelse. Nedbrytningen av faste stoff til brennbar gass skjer i flere trinn, se figur 13.6.

Produksjonen av brennbar gass må være stor nok til at det dannes en blanding av luft og gass med en konsentrasjon som er høyere enn den nedre brennbarhetsgrensen for gassen som produseres. Hvor mye energi som må tilføres materialet for å resultere i faseoverganger, vil variere. For faste stoff er det ingen begrep tilsvarende flammepunkt eller antennelsetemperatur, og faste stoff er ikke kategorisert etter hvor lett stoffene antennes.

I tabell 13.4 er det oppgitt verdier for antennelse av noen faste stoff. Antennelsen vil være avhengig av faktorer som varmestråling, type tennkilde¹¹ og hvor varm den omliggende luften er.

Tabell 13.4: Kriterier for antennelse av faste materialer [26].

Materialer	Kritisk		Kritisk	
	varmestrålingsfluks		overflatetemperatur	
	(kW/m ²)		(°C)	
	Pilot	Spontan	Pilot	Spontan
Tre	12	28	350	600
Polymetylmetakrylat*	11	-	310	-
Polyetylen	15	-	363	-
Polypropylen	15	-	334	-
Polystyrene	13	-	366	-

* PMMA eller Plexiglass

13.3 Antennelse uten tennkilde

Antennelse av et materiale uten en tennkilde kan forekomme som følge av intern eller ekstern oppvarming. Disse formene for antennelse blir beskrevet som henholdsvis selvantennelse og spontanantennelse.

13.3.1 Selvantennelse

Selvantennelse oppstår når et materiale selv begynner å produsere energi og energien ikke blir transportert bort i like stor grad som den produseres [26]. Energiproduksjonen

¹¹ Begrepet "Pilot" i tabellen, henviser til at det er en antennelseskilde tilstede ved forsøkene som er gjort.

vil medføre en temperaturøkning, og idet temperaturen når antennelsestemperaturen vil materialet antenne. Energiproduksjonen kan oppstå som følge av oksidasjonsreaksjoner i materialet, eller p.g.a. bakterier som produserer varme [26, 36].

I de tilfeller varmen produseres av bakterier, vil ikke temperaturen i brenselet bli høyere enn 50 til 75 °C fordi bakteriene vil dø. For å få en antennelse i disse tilfellene, må en kjemisk reaksjon videreføre varmeproduksjonen frem til antennelse [5].

Det er en rekke forskjellige materialer som kan selvantenne. Kjennetegn på disse materialene er at de er porøse og dermed slipper inn oksygen til sonen hvor det foregår en pyrolyse eller ulmebrann. Videre må materialet forme et rigid eller hardt kullag ved forbrenning [26]. To vanlige eksempler på materialer som selvantenner er fuktig høy og filler som er fuktet med linolje, andre eksempler er gitt i tabell 13.5.

13.3.2 Spontanantennelse

Spontanantennelse oppstår når et materiale blir påvirket av en ekstern varmestrålingskilde¹². Denne kilden er ikke i kontakt med materialet, men varmen er så kraftig at materialet begynner å pyrolysere og avgis gasser [26].

Avgivelse eller fordampning av brennbare gasser fra væsker eller faste stoff, er sterkt knyttet til begrepet brennbarhetsgrenser som er gitt for vanlige gasser. Bli en gass varmet tilstrekkelig opp, vil den spontanantenne uten en ekstern tennkilde [58]. Det samme vil være gjeldende for gassene som avgis fra enten væsker eller faste stoff.

For å få antennelse, må varmen være så kraftig at de varme gassene som fordamper fra et materiale, har en temperatur som er høyere enn spontan-antennelsestemperaturen [26]. Denne temperaturen vil variere fra materiale til materiale. I tabell 13.6 er det gitt noe eksempler på spontan-antennelsestemperaturer.

¹²Den eksterne varmekilden kan være både meget høy lufttemperatur eller kraftig varmestråling. Innen praktiske branttekniske spørsmål vil varmestrålingen være mest aktuell.

Tabell 13.5: Eksempler på materialer som kan selvantenne [26].

Materialer	Tendens for selvantennelse	Tiltak for å hindre selvantennelse	Bemerkninger
Koks	Høy	Må lagres tørt og rommet ventileres godt.	Det bør unngås at koks blir våt og så tørkes.
Høy	Moderat	Må lagres tørt og kaldt.	Vått høy vil produsere varme i varmt vær. Høyballer vil sjelden varmes opp tilstrøkkelig til antennelse.
Linolje	Høy	Det må unngås at linolje kommer i kontakt med kluter, bomull eller andre brennbare materialer lagret av fiber.	Kluter eller stoff som er fuktet med linolje er svært farlige. Det må unngås at klutene lagres i hauger hvor selvantennelse kan forekomme.
Sågmugg	Mulig	Unngå oljer og varme fuktige lagre.	Delvis brent eller forkullet sågmugg kan være farlig.
Ullrester	Moderat	Ullrestene må lagres kaldt, godt ventilert, eventuelt i tette beholdere. Unngå høy fuktighet.	Ullrester inneholder ofte olje etter vevingen og spinningen og dette kan medføre varmeproduksjon. Våte ullrester er veldig utsatt for selvantennelse.

Tabell 13.6: Spontan-antennelsestemperatur [26].

Gass eller damp	Kjemisk formel	Minimum spontanantennelsestemperatur (°C)
Hydrogen	H ₂	400
Carbon disulfid	CS ₂	90
Carbon monoksid	CO ₂	609
Metan	CH ₄	601
Etan	C ₂ H ₆	472
Propan	C ₃ H ₈	450
n-Butan	n-C ₄ H ₁₀	288
iso-Butan	C ₄ H ₁₀	460
n-Oktan	n-C ₈ H ₁₈	206
iso-Oktan	C ₈ H ₁₈	415
Eten	C ₂ H ₄	450
Etyn (Acetylene)	C ₂ H ₂	305
Metanol	CH ₃ OH	385
Etanol	n-C ₂ H ₅ OH	363
Aceton	C ₃ H ₆ O	465
Benzen	C ₆ H ₆	560

Kapittel 14

Røykproduksjon

Røyk er det produktet fra branner som i hovedsak dreper mennesker, samt skader bygg og eiendeler. Det er derfor viktig å forstå hvor mye røyk som produseres, samt å se på hvilke stoffer røyk består av.

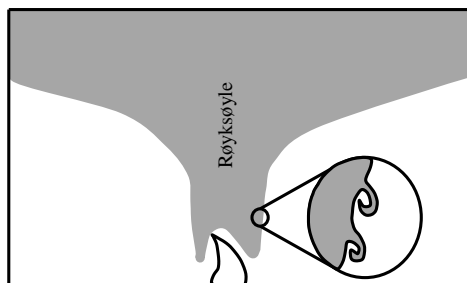
I dette kapitlet vil det bli gitt en innføring i produksjon av røyk og enkelte gasser i røyk. Videre vil det bli sett på skader som følge av eksponering til røyk.

14.1 Definisjon av røyk

Røyk er blitt definert forskjellig avhengig av hvordan begrepet brukes i diskusjoner som omhandler røyk. Det er to definisjonsmåter som er vanlig innen brannteknikk [26]. Den ene definisjonsmåten omtaler røyk som forbrenningsproduktene fra brannen. Den andre definisjonsmåten omtaler røyk som en blanding av forbrenningsprodukt og luft som blandes i røyksøylen. I denne boken vil definisjonsmåten som inneholder både forbrenningsprodukt og luft bli brukt. Definisjonen som benyttes er hentet fra KBT (www.kbt.no):

Røyk er en blanding av gasser og aerosoler, inkludert partikler og innblandet luft, som dannes ved forbrenning eller pyrolyse i en brann.

Med bakgrunn i den valgte definisjonen av røyk, vil betegnelsen forbrenningsprodukt kun bli brukt om de stoffene som er et direkte resultat av forbrenningen. Eksempler på disse produktene er: sotpartikler, vanndamp, karbondioksid, karbonmonoksid samt andre gasser som saltsyre (HCl) og blåsyre (HCN) [90]. Luften som er tilstede i røyk, er blandet med forbrenningsproduktene som følge av turbulens i røyksøylen, se figur 14.1. Turbulens i røyksøylen og den medfølgende innblandingen av luft er direkte avhengig av størrelsen på brannens varmeproduksjon. Mengden innblandet luft er sentral for røykvolumets størrelse, og vil påvirke spredningen av røyken [26].



Figur 14.1: Turbulente virvler i røyksøylen river med luft.

14.2 Røykskader

Røyk kan skade mennesker, objekter og bygninger. Når mennesker blir skadet av røyk, skjer dette som oftest som følge av forgiftning ved inhalering av røykgasser. Den vanligste gassen som personer dør av i forbindelse med brann, er karbonmonoksid (CO) [26, 80]. Men også karbondioksid (CO_2), blåsyre (HCN) og saltsyre (HCl) kan ha en innvirkning på personer som oppholder seg i røyk. Røyk kan også påvirke personer ved å redusere sikten. Dette kan medføre vansker med å orientere seg i røykfylte områder i forbindelse med rømning [26].

Dersom det brenner, vil røykgassene også skade og ødelegge gjenstander og objekter. Skadene på gjenstandene vil variere fra lett røyklukt til nedsooting. Ved nedsooting kan korrosive gasser og partikler skade ømfintlige deler i for eksempel elektronisk apparatur. Røykskader kan være svært alvorlig i bedrifter som leverer produkt som skal være uten forurensninger. Eksempler på slik industri kan være farmasøytiske bedrifter, elektronikkindustri eller matprodusenter.

14.2.1 Røykskade på person

Røyk kan skade personer enten ved at giftig røyk pustes inn eller ved at varm røyk skader luftveiene og lungene. Den vanligste dødsårsaken ved brann er karbonmonoksidforgiftning, men også varm røyk kan forårsake alvorlige skader.

Toksikologisk skade på person

Røyk kan inneholde en rekke forskjellige kjemiske stoffer som kan påvirke mennesker. Undersøkelser viser at ca. 50 % av alle dødsfall forårsaket av brann kan relateres til karbonmonoksid-forgiftning [60]. De resterende 50 % av dødsfallene i brann er forårsaket av andre typer gasser, trykk fra eksplosjoner eller forbrenningsskader [60].

I tabell 14.1 er det oppgitt noen LC₅₀-konsentrasjoner ved henholdsvis 5 og 30 minutter. LC står for lethal concentration. LC₅₀-konsentrasjonene er funnet ved dyreforsøk og tilsier at 50 % av forsøksdyrene dør ved eksponering av den gitte konsentrasjonen i løpet av det aktuelle tidsrommet [60]. F.eks. vil halvparten av forsøksdyrene dø i løpet av 5 minutter ved en HCN¹-konsentrasjon² på 280 ppm.

Det er flere kontroversielle forhold rundt bruken av LC₅₀-konsentrasjonene. Det er mange som reagerer på at det blir gjennomført dyreforsøk hvor hensikten er å bestemme hvilke konsentrasjoner av stoff som dreper forsøksdyrene. Det er gjort forsøk med å utvikle kjemiske analyser som kan erstatte dyreforsøkene, men det er ikke utviklet gode nok analyser enda. Vanskene med kjemiske analyser er at de ikke kan oppdage nye kjemiske komponenter og giftigheten av disse. Så selv om det kan stilles etiske spørsmålstegn ved disse dyreforsøkene, er dette dessverre den eneste måten pr. i dag til å finne ut om et stoff er giftig eller ikke. Et annet forhold rundt LC₅₀-konsentrasjonene er korrelasjonen mellom mennesker og dyr. Det blir antatt at LC₅₀-konsentrasjonene for forsøksdyrene er lik LC₅₀-konsentrasjonene for mennesker. Dette er ikke bekreftet vitenskapelig fordi det da måtte gjøres forsøk på mennesker. Så selv om tallene i tabell 14.1 er fremkommet via dyreforsøk, blir det antatt at disse tallene også gjelder for mennesker.

Tabell 14.1: Dødelig konsentrasjon av gasser (LC₅₀) [46, 61].

Gass	Formel	LC	
		5 min (ppm)	30 min (ppm)
Karbonmonoksid	CO	12 000	3000
Karbondioksid	CO ₂	> 150 000	> 150 000
Hydrogen cyanid (Blåsyre)	HCN	280	135
Hydrogen klorid (Saltsyre)	HCl	16 000	3700
Hydrogen fluorid	HF	10 000	2000

Termisk skade på person

Varm røyk kan eksponere personer for svært høye lufttemperaturer og mye varmeråling. Personer som har vært utsatt for varm røyk vil få skader som: overoppheting (hypertermia), forbrenningskader på hud eller på åndedretsorganene [80].

Overoppheting oppstår når kroppskjernetemperaturen overstiger 40 °C. En person med så høy kroppstemperatur vil få nedsatt bevissthet, bli forvirret og svært syk [80].

¹HCN er blåsyre.

²Konsentrasjon oppgis gjerne i ppm som står for "parts pr. million". Vi er vant med prosent: $\frac{1}{100}$ mens ppm er $\frac{1}{1\,000\,000}$

Kroppskjernetemperaturer over 42,5 °C vil medføre død i løpet av minutter p.g.a. hjertesvikt [80]. Kroppen vil begynne å overopphete i fuktig luft med temperatur på 80 °C og i tørr luft med en temperatur på 120 °C [60, 80].

Forbrenningsskader på hud og åndedretsorgan kan oppstå som følge av varm luft eller røyk, varmeråling eller berøring av varme objekter. For varm, tørr luft vil smerter begynne å inntre ved 120 °C. Se figur 14.2 for flere verdier.

14.2.2 Røykskade på objektet

Røyken fra en brann kan skade objekter på forskjellige måter. Skadene kan oppstå på grunn av termisk påvirkning som følge av høy temperatur i røyken, eller ved kjemisk påvirkning som følge av komponenter i røyken.

Termiske skader

Røyk kan ha svært høy temperatur, og den termiske belastningen den varme røyken gir objekter og konstruksjoner gjør at disse kan få midlertidige eller permanente deformasjoner og redusert bæreevne [36]. Et eksempel er ubeskyttet stål som vil miste 30-70 % av bæreevnen ved en temperaturøkning på rundt 500 °C [13].

Andre materialer vil også påvirkes av høyere temperaturer. Betong vil miste bæreevne dersom det varmes opp. Videre kan det oppstå eksplosjonsartet avskalling i betongen fordi fritt vann vil fordampe og øke trykket i porer o.l. Høye temperaturer vil også medføre at treverk forkuller. Før forkullingen pågå lenge nok, vil treverket miste bæreevnen sin [13].

Kjemiske skader

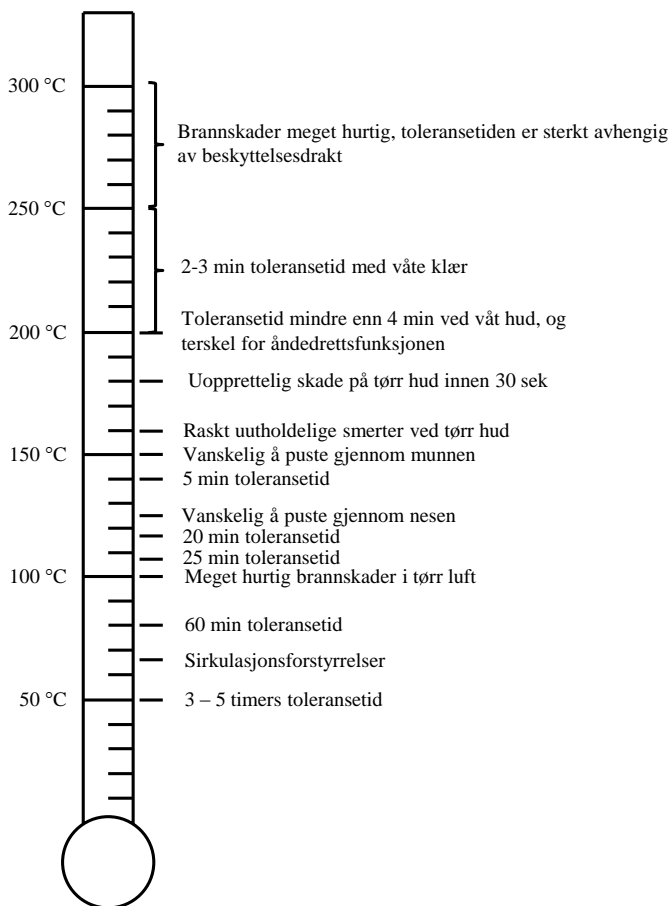
Sot i røyken kan inneholde en rekke komponenter som kan være skadelige for objekter og gjenstander. Når sot inneholder svoveloksid eller kull vil det kunne forekomme nedsverting og kjemiske angrep på de flatene som soten er i kontakt med. Videre kan sot inneholde saltsyre som blir dannet ved forbrenning av PVC [33]. Saltsyre og andre syreforbindelser kan forårsake korrosjonsskader på elektriske komponenter o.l.

Det kan også oppstå korrosjon på armeringen til betongen. Dersom betongelement har fått sprekker eller det har oppstått avskalling, kan armeringen i betongen ligge åpen og dermed påvirkes av salter o.l.

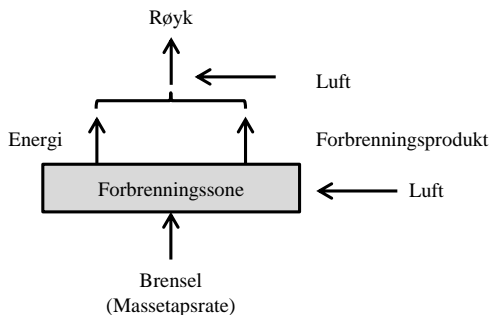
14.3 Forbrenningsprodukt fra brann

Brensel som forbrenner eller pyrolyserer i forbindelse med en brann vil produsere forskjellige forbrenningsprodukt. Produksjonen av disse produktene er svært avhengig av tilgangen på oksygen til forbrenningssonen. Videre vil bestanddeler i brenselet bestemme hvilke produkter som genereres. I dette avsnittet vil bestanddelene av forbrenningsproduktene som inngår i røyken bli nærmere diskutert.

Det blir produsert forskjellige gasser i forbrenningsprosessene ved brann. Hvilke gasser som produseres er svært avhengig av brenselet. I litteraturen er det mest fokus på



Figur 14.2: Termiske skader som følger av høy temperatur.



Figur 14.3: Brensel og forbrenningsprodukt.

karbonmonoksid (CO) og karbondioksid (CO₂). Disse gassene er de mest dominante gassene ved henholdsvis ulmebrann og flammebrann. I tabell 14.2 er det gitt noen eksempler på produksjonsfaktorer [90]. For flere verdier, kan tabell C.2 benyttes.

Tabell 14.2: Produksjonsfaktorer for godt ventilerte branner [90].

Material	Formel	y_{CO_2}	y_{CO}
Etan	C ₂ H ₆	2,85	0,001
Etanol	C ₂ H ₅ OH	1,77	0,001
Benzen	C ₆ H ₆	2,33	0,067
Heptan	C ₇ H ₁₆	2,85	0,01
Tre (Gran)		1,33	0,004
Tre (Furu)		1,31	0,005

For å beregne produksjonen av forskjellige forbrenningsgasser, blir det tatt utgangspunkt i massetapsraten³ fra brenselet. Videre blir det multiplisert med en faktor (γ) som gjenspeiler hvilken forbrenningsgass det er snakk om og under hvilke forhold brannen oppstår. Ligning 14.1 kan benyttes for å beregne produksjonen av enkeltgasser fra en brann.

$$\dot{m}_j = \gamma_j \cdot \dot{m}'' \cdot A \quad (14.1)$$

hvor:

\dot{m}_j er produksjonsraten for den aktuelle enkeltgassen (g/s)

γ_j er produksjonsfaktoren for den aktuelle gassen (-)

³Massetapsraten er diskutert i kap. 11.3.4.

\dot{m}'' er massetapsraten for brannen ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

A er arealet til brannen (m^2)

Eksempel 14.1

Beregn hvor mye CO_2 som produseres i en heptan-brann med et massetap på $28,75 \text{ g}/\text{m}^2\text{s}$ og et areal på $1,13 \text{ m}^2$. Massetapsraten er beregnet i eksempel 11.7.

Løsning:

CO_2 -produksjonen kan beregnes ved å bruke ligning 14.1.

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{CO}_2} &= \gamma_{\text{CO}_2} \cdot \dot{m}'' \cdot A \\ &= 2,85 \cdot 28,75 \text{ g}/\text{m}^2\text{s} \cdot 1,13 \text{ m}^2 \\ &= 92,6 \text{ g/s}\end{aligned}$$

CO_2 -produksjonen for denne brannen er ca. 93 g/s .

Eksempel 14.2

Beregn hvor mye CO som produseres i en benzen-brann med et massetap på $113,47 \text{ g}/\text{m}^2\text{s}$ og et areal på $0,0551 \text{ m}^2$. Massetapsraten er beregnet i eksempel 11.8.

Løsning:

CO -produksjonen kan beregnes ved å bruke ligning 14.1.

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{CO}} &= \gamma_{\text{CO}} \cdot \dot{m}'' \cdot A \\ &= 0,067 \cdot 113,47 \text{ g}/\text{m}^2\text{s} \cdot 0,0551 \text{ m}^2 \\ &= 0,42 \text{ g/s}\end{aligned}$$

CO -produksjonen for denne brannen er ca. $0,5 \text{ g/s}$.

14.4 Røykproduksjon

Røyk fra en brann vil stige oppover som følge av forskjeller i tetthet mellom omliggende luft og varme forbrenningsprodukt [59]. Den stigende røyken danner det som omtales som en røyksøyle⁴. Når røyken stiger, vil den være svært turbulent og det vil oppstå virvler i røyksøylen. Virvlene i ytterkanten av røyksøylen vil rive med seg omliggende luft, se figur 14.1 [26]. Den medrevne luften vil være med på å øke massen som transporteres i røyksøylen. I tillegg vil også den kalde luften kjøle ned forbrenningsproduktene i røyken [59].

14.4.1 Røyksøyleteori

Det er utviklet flere teoretiske modeller for masseraten for røykproduksjonen (\dot{m}), og de fleste av disse teoriene er basert på forholdene gitt i ligning 14.2 [60]. Disse forholdene er utledet med bakgrunn i betraktninger av forskjeller i tetthet mellom luft og røyk [26, 59, 60].

$$\dot{m} = C \dot{q}_c^{1/3} z_*^{5/3} \quad (14.2)$$

hvor:

\dot{m} er masseraten for røykproduksjonen (kg/s)

\dot{q}_c er den konvektive delen av varmeproduksjonen (kW)

z_* er høyden fra en punktkilde til røyklaget (m)

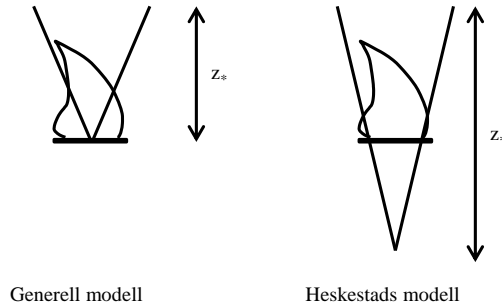
C er en konstant

Forskjellene i de ulike teoriene som er utledet, ligger i forskjellige verdier av konstanten C [60]. I denne boken vil teorien til Gunnar Heskestad⁵ bli diskutert nærmere.

Teorien som ligning 14.2 bygger på, er omtalt som en punktkildeteori. Denne teorien er basert på en antagelse om at brannens energi og forbrenningsprodukt kommer fra et punkt som omtales som punktkilden. Videre blir det brukt en høyde z_* som er høyden fra punktkilden til røyklaget eller høyden av interesse. Innen brannteknikk er det vanskelig å bruke antagelsen om at brannen kan sees på som en punktkilde [26, 59, 60]. Brenselet til en brann, og dermed kilden, vil ha en viss utstrekning som bryter med antagelsen om en punktkilde. Det er i denne forbindelsen Heskestads ligninger kommer med et viktig bidrag. I Heskestads ligninger blir det innført et virtuelt origo (punkt-kilden), slik at punktkildeteoriens høyde z_* stemmer overens med brannens energiproduksjon og diameter [26]. Se figurene 14.4, 14.6 og 14.7. Ligningene forklares nærmere nedenfor.

⁴Det er noen som ønsker å omtale røyksøylen som en brann- eller røykplume. Plume er et engelsk ord, som betyr fasanfjær eller noe som stiger og bølger som en fjær, f.eks en røyksøyle [16]. De fleste i Norge kjenner uttrykket røyksøyle fra cowboy- og indianerbøker og filmer. Det er uheldig å innføre engelske ord og uttrykk når det eksisterer norske ord som dekker det samme.

⁵Heskestad er opprinnelig fra Norge, men har bodd i USA i mange år. Hans teorier for røykproduksjon er brukt og anerkjent både i Norge og i resten av verden.



Figur 14.4: Prinsippskisse for punktilder.

14.4.2 Ligning for røykproduksjon

For å kunne beregne røykproduksjonen til en brann, er det flere forhold som må avklares. Disse forholdene er brannens diameter, varmeproduksjon og høyden fra brenselet og opp til røyklaget. Når disse forholdene er bestemt, må det også vurderes om flammene vil nå røyklaget eller ikke. Dette er viktig fordi dersom flammene når røyklaget, vil røyklaget bli varmet opp hurtigere fordi mindre luft blir blandet inn og kjøler røyken. Hvorvidt flammene når røyklaget eller ikke, kan bestemmes ved å beregne flammehøyden (L). Høyden L viser til den høyden hvor flammen vil være tilstede 50 % av tiden⁶ [26, 60, 68].

Det er utledet til ligninger for røykproduksjon henholdsvis over og under flammehøyden (se ligning 14.3 og 14.4). For å kunne bruke dette ligningssettet, må flammehøyden beregnes, for så å vurdere hvilken av de to ligningene som skal brukes.

$$\dot{m} = 0,071 \dot{q}_c^{1/3} \cdot (z - z_o)^{5/3} + 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{q}_c \quad (14.3)$$

$$\dot{m} = 0,0056 \dot{q}_c \frac{z}{L} \quad (14.4)$$

Flammehøyde

Flammehøyden (L) kan beregnes ved å bruke ligning 14.5 [60, 68].

$$L = 0,235 \dot{q}^{2/5} - 1,02D \quad (14.5)$$

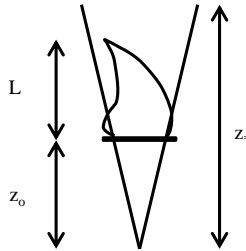
hvor:

L er flammehøyden (m)

\dot{q} er total varmeproduksjon (kW)

⁶Flammehøyden (L) viser enten til høyden hvor flammen vil være tilstede 50 % av tiden eller til høyden hvor gjennomsnittstemperaturen i flammen er 500 K høyere enn romtemperaturen. Tidligere ble det skilt mellom disse to høydene. Forskjellen mellom høydene er liten, og dette skulle gjøres ikke lenger.

D er brannens diameter (m)



Figur 14.5: Prinsippskisse for flammehøyde.

Når flammehøyden er funnet, må det vurderes om L er større eller mindre enn høyden opp til røyklaget (z).

- Dersom $L < z$ må ligningene for røykproduksjon over flammehøyden benyttes (dvs. ligning 14.3).
- Dersom $L > z$ må ligningene for røykproduksjon under flammehøyden benyttes (dvs. ligning 14.4).

Ved transiente beregninger hvor røyklaget synker ned mot brenselet, kan det oppstå situasjoner hvor røyklaget passerer flammehøyden. Dette betyr at begge ligningene for røykproduksjon må brukes i beregningene av det samme scenarioet. Det er derfor viktig å ta hensyn til hvor røyklaget er i forhold til flammehøyden.

14.4.3 Røykproduksjon over flammehøyden

I de tilfeller hvor den aktuelle høyden z er større enn flammehøyden L , brukes ligning 14.6 til å beregne røykproduksjonen [26, 48].

$$\dot{m} = 0,071 \dot{q}_c^{1/3} \cdot (z - z_0)^{5/3} + 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{q}_c \quad (14.6)$$

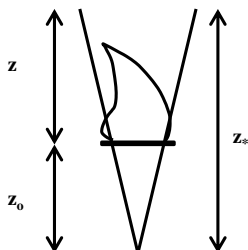
hvor:

\dot{m} er masseraten for røykproduksjonen (kg/s)

\dot{q}_c er den konvektive delen av varmeproduksjonen (kW)

z er høyden fra toppen av brenselet og til røyklaget (m)

z_0 er høyden fra brenselet til det virtuelle origo (m)



Figur 14.6: Prinsippskisse for røyksoyle.

Røykproduksjonen som beregnes i ligning 14.6, blir oppgitt som masse pr. tidsenhet (kg/s). I forbindelse med røykkontroll er det mer praktisk å omtale røyk som et volum. Derfor blir røykproduksjonsraten (\dot{m}) omgjort til et røykvolum ved å dividere på luftens tetthet ρ . Røykproduksjonsraten blir dermed oppgitt som volum pr. tidsenhet (m^3/s). Tettheten til luft ved 20 °C og 1 atm, er 1,2 kg/m³. Denne verdien blir vanligvis brukt i forbindelse med beregninger innen brannteknikk. Ved behov for høyere grad av nøyaktighet kan luftens tetthet relateres til lufttemperaturen, slik at temperaturens innvirkning på tettheten kan inkluderes i beregningene. Dette gjøres ved å benytte den ideelle gassloven⁷.

Virtuelt origo

Røyksoyleteorien til Heskestad baseres på en punktkildeteori. Det må derfor beregnes hvor det virtuelle origo (punktkilden) til brannen er i forhold til brenselet. Dette er vist i figur 14.7.

Det virtuelle origo beregnes ved hjelp av ligning 14.7 [26, 60, 68].

$$z_0 = 0,083 \dot{q}^{2/5} - 1,02D \quad (14.7)$$

hvor:

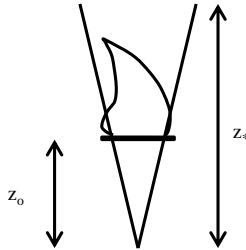
z_0 er høyden fra brenselet til det virtuelle origo (m)

\dot{q} er den totale varmeproduksjonen til brannen (kW)

D er brannens diameter (m)

Verdien til z_0 kan være både positiv og negativ [48]. For branner som avgir lite energi pr. areal, vil det virtuelle origo ligge under brenseles-nivået, mens for branner med høy

⁷Den ideelle gassloven er diskutert i kapitlet om generell kjemi.



Figur 14.7: Prinsippskisse for virtuelt origo.

energiproduksjon pr areal, vil det virtuelle origo ligge over brensnivået [59]. Figur 14.8 viser hvordan det virtuelle origo heptan og etanol endres som funksjon av den totale energiproduksjonen.

14.4.4 Røykproduksjon under flammehøyden

I de tilfellene høyden av interesse z er mindre enn flammehøyden (L), kan ligning 14.8⁸ brukes ved beregningen av røykproduksjonen [59].

$$\dot{m} = 0,0056 \dot{q}_c \frac{z}{L} \quad (14.8)$$

hvor:

\dot{m} er masseraten for røykproduksjonen (kg/s)

\dot{q}_c er den konvektive delen av varmereproduksjonen (kW)

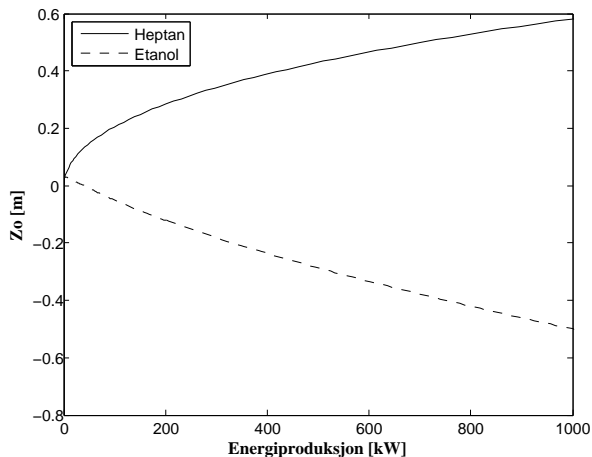
z er høyden fra toppen av brenselet og til røyklaget (m)

L er flammehøyden (m)

Dersom røykmassen ønskes omgjort til et røykvolum, divideres røykproduksjonsraten (\dot{m}) med luftens tetthet.

⁸I en del eldre litteratur blir det brukt en annen ligning (se under), samt det som omtales som begrensende flammehøyde. Dette er nå forenklet ved bruken av ligningene 14.5 og 14.8.

$$\dot{m} = \frac{0,0054 \dot{q}_c z}{(0,166 \dot{q}_c^{2/5} + z_0)}$$



Figur 14.8: Virtuet origo som funksjon av energiproduksjon.

14.5 Gjennomgående eksempler av røykproduksjon

I dette avsnittet vil det bli vist to eksempler som viser hele prosedyren for beregning av røykproduksjon. I begge tilfellene vil det bli tatt utgangspunkt i en viss varmeproduksjon, og så vil det bli beregnet hvor mye røyk som blir produsert for høyder som er henholdsvis over og under flammehøyden (L).

14.5.1 Eksempel med varmeproduksjon på 1500 kW

Utgangspunktet for dette eksemplet er en brann med en varmeproduksjon på 1500 kW og en diameter på 1,2 m. Røykproduksjonen skal beregnes for følgende høyder: 2 og 15 meter over brenselet. Gangen i beregningen vil være som følger:

- Finn flammehøyden.
- Vurder om høyden av interesse er over eller under flammehøyden.
- Beregn røykproduksjonen.

Beregning av flammehøyden

For å finne flammehøyden, kan ligning 14.5 benyttes.

$$\begin{aligned} L &= 0,235 \dot{q}^{2/5} - 1,02D \\ &= 0,235 \cdot (1500 \text{ kW})^{2/5} - 1,02 \cdot 1,2 \text{ m} \\ &= 3,16 \text{ m} \end{aligned}$$

Flammehøyden er 3,16 m for denne brannen. Dvs. at for høydene på 2 m og 15 m, må henholdsvis ligning 14.8 og 14.6 brukes.

Beregning av røykproduksjon under flammehøyden

For å finne røykproduksjonen for denne brannen, kan ligning 14.8 benyttes. Denne ligningen forutsetter at høyden fra brenselet til røyklaget er mindre enn flammehøyden. Videre blir det antatt at den konvektive delen av varmereproduksjonen er 70 % av den totale.

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 0,0056 \dot{q}_c \frac{z}{L} \\ &= 0,0056 \cdot (0,7 \cdot 1500 \text{ kW}) \cdot \frac{2 \text{ m}}{3,16 \text{ m}} \\ &= 3,7 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Røykproduksjonen ved 2 meters høyde for brannen med en energiproduksjon på 1500 kW er 3,7 kg/s.

Beregning av røykproduksjon over flammehøyden

For å finne røykproduksjonen for denne brannen, kan ligning 14.6 benyttes. Denne ligningen forutsetter at høyden fra brenselet til røyklaget er større enn flammehøyden. Videre blir det antatt at den konvektive delen av varmereproduksjonen er 70 % av den totale.

Før røykproduksjonen kan beregnes, må det virtuelle origo bestemmes ved å bruke ligning 14.7.

$$\begin{aligned} z_0 &= 0,083 \dot{q}^{2/5} - 1,02D \\ &= 0,083 \cdot (1500 \text{ kW})^{2/5} - 1,02 \cdot 1,2 \text{ m} \\ &= 0,32 \text{ m} \end{aligned}$$

Det virtuelle origo for denne brannen ligger 0,32 m over brenseloverflaten.

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 0,071 \dot{q}_c^{1/3} \cdot (z - z_0)^{5/3} + 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{q}_c \\ &= 0,071 \cdot (0,7 \cdot 1500 \text{ kW})^{1/3} \cdot (15 \text{ m} - 0,32 \text{ m})^{5/3} \\ &\quad + 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot (0,7 \cdot 1500 \text{ kW}) \\ &= 65,5 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Røykproduksjonen for denne brannen er 65,5 kg/s. Røykvolumet kan beregnes ved å dele på tettheten til luft som er ca. 1,2 kg/m³. I dette eksempelet blir volumet 55 m³/s.

14.5.2 Eksempel med varmeproduksjon på 250 kW

Utgangspunktet for dette eksemplet er en brann med en varmeproduksjon på 250 kW og en diameter på 0,26 m. Røykproduksjonen skal beregnes for følgende høyder: 1 og 10 meter over brenselet.

Beregning av flammehøyden

For å finne flammehøyden, kan ligning 14.5 benyttes.

$$\begin{aligned}L &= 0,235 \dot{q}^{2/5} - 1,02D \\ &= 0,235 \cdot (250 \text{ kW})^{2/5} - 1,02 \cdot 0,26 \text{ m} \\ &= 1,87 \text{ m}\end{aligned}$$

Flammehøyden er 1,87 m for denne brannen. Dvs. at for høydene på 1 m og 10 m, må henholdsvis ligning 14.8 og 14.6 brukes.

Beregning av røykproduksjon under flammehøyden

For å finne røykproduksjonen for denne brannen, kan ligning 14.8 benyttes. Denne ligningen forutsetter at høyden fra brenselet til røyklaget er mindre enn flammehøyden.

$$\begin{aligned}\dot{m} &= 0,0056 \dot{q}_c \frac{z}{L} \\ &= 0,0056 \cdot (0,7 \cdot 250 \text{ kW}) \cdot \frac{1 \text{ m}}{1,87 \text{ m}} \\ &= 0,5 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Røykproduksjonen for brannen med en energiproduksjon på 250 kW ved 1 m høyde er 0,5 kg/s.

Beregning av røykproduksjon over flammehøyden

For å finne røykproduksjonen for denne brannen, kan ligning 14.6 benyttes. Denne ligningen forutsetter at høyden fra brenselet til røyklaget er større enn flammehøyden. Videre blir det antatt at den konvektive delen av varmeproduksjonen er 70 % av den totale.

Før røykproduksjonen kan beregnes, må det virtuelle origo bestemmes ved å bruke ligning 14.7.

$$\begin{aligned}z_0 &= 0,083 \dot{q}^{2/5} - 1,02D \\ &= 0,083 \cdot (250 \text{ kW})^{2/5} - 1,02 \cdot 0,26 \text{ m} \\ &= 0,49 \text{ m}\end{aligned}$$

Det virtuelle origo for denne brannen ligger 0,49 m over brenseloverflaten.

$$\begin{aligned}\dot{m} &= 0,071 \dot{q}_c^{1/3} \cdot (z - z_o)^{5/3} + 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{q}_c \\ &= 0,071 \cdot (0,7 \cdot 250 \text{ kW})^{1/3} \cdot (10 \text{ m} - 0,49 \text{ m})^{5/3} \\ &\quad + 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot (0,7 \cdot 250 \text{ kW}) \\ &= 17,3 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Røykproduksjonen for denne brannen er 17 kg/s. Røykvolumet kan beregnes ved å dele på tettheten til luft som er ca. 1,2 kg/m³. I dette eksempelet blir volumet ca. 14 m³/s.

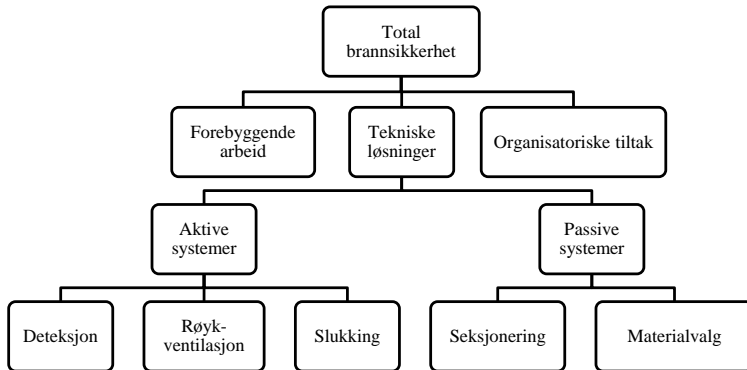
Del V
Brannvern

Kapittel 15

Brannteknisk perspektiv

15.1 Introduksjon

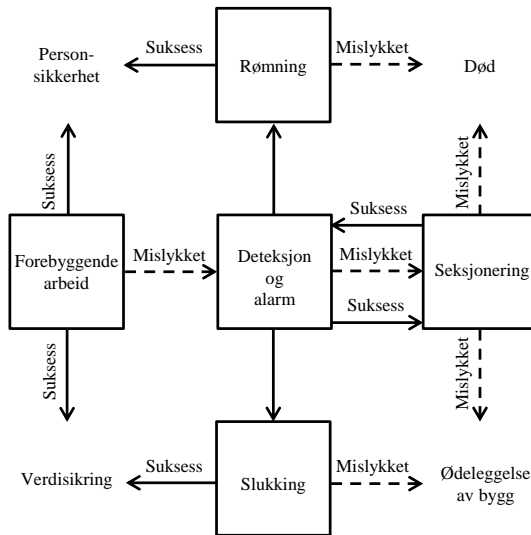
Brannvern har mange sider som må ivaretas både ved prosjektering og daglig drift av bygg, båter, oljeplattformer o.l. Generelt kan brannvern deles inn i forebyggende brannvernsarbeid, organisatoriske tiltak og tekniske løsninger, se figur 15.1. Det forebyggende arbeidet er rettet mot opplæring av personell, kvalitetsssikring av bygg og anlegg, samt implementering av gode tekniske løsninger. De organisatoriske tiltakene omfatter både lokale tiltak som brannvernledere, økt bemanning ved økt risiko og industribrannvesen og sentrale tiltak som kommunalt brannvesen. De tekniske løsningene kan være aktive systemer som deteksjonssystem, sprinklersystem og røykventilasjon, eller passive systemer som f.eks. bruk av forskjellige materialer og seksjonering.



Figur 15.1: Total brannsikring.

Det er viktig å se hvordan forebyggende arbeid, organisatoriske tiltak og tekniske løsninger sammen gir en total brannsikring. I figur 15.2 er det en skisse som viser hvordan

elementene innen brannsikring virker sammen [88]. Skissen viser at dersom et element i brannsikringen svikter, så må et eller flere av de andre elementene aktiveres for å ivareta sikkerheten.



Figur 15.2: Brannvernsmatrise.

15.2 Forebyggende brannvern og organisatoriske tiltak

Forebyggende arbeid er en kontinuerlig prosess som ivaretas på en rekke forskjellige måter. Det offentlige organiserer det forebyggende arbeidet via lover, forskrifter, informasjon og opplæring, mens private organisasjoner og bedrifter organiserer dette arbeidet via opplæring og øvelser. Organisatoriske tiltak som brannvesen, beredskap etc. inngår også i det forebyggende arbeidet.

15.2.1 Offentlig brannvern

Sammfunnet organiserer sitt forebyggende brannvern via fagmyndigheter som utarbeider lover og forskrifter på vegne av Storting og regjering. I dag er disse fagmyndighetene Direktoratet for byggkvalitet (DiBK) og Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB). De viktigste lovene som styrer brannvernet er: Plan og Bygningsloven og Brann- og Eksplosjonsvernsloven. Ut fra disse lovene er det gitt ut en rekke forskrifter som gir føringer om forebyggende brannvern. Noen av disse føringene er:

- Krav om brannsikring av bygg
- Krav om opprettholdelse av brannsikring
- Krav om opplæring av ansatte og brukere av et bygg
- Krav om kommunalt brannvesen og dimensjonering av dette
- Krav om forebyggende avdeling i brannvesenet
- Krav om røykvarsler i alle hjem
- Krav om slukkeutstyr i alle hjem

De kravene som blir stilt via lover og forskrifter skal dokumenteres som en del av internkontrollsystemet til den enkelte kommune eller bedrift. I tillegg til direkte krav om brannvern, vil fagmyndighetene også gjennomføre informasjonskampanjer for å gjøre publikum oppmerksom på spesielt farlige situasjoner. To klassiske eksempler er skogbrannsfare og bruk av fyrverkeri.

En mer grunnleggende form for forebyggende brannvern er det som skjer på skoler og i barnehager. Her får barn og unge viktig informasjon og opplæring om brannvern, og dette er en type opplæring som følger dem gjennom hele livet.

15.2.2 Privat brannvern

Forebyggende brannvern er et kontinuerlig arbeid, som bør starte når bygg etc. planlegges. Når bygget prosjekteres og bygges blir byggeforskrifter brukt for å ivareta et minimumkrav til brannsikring. Når bygget er ferdig vil det bli igangsatt mer tradisjonelt forebyggende brannvern som beskrevet i Forskrift om branntforebyggende tiltak og tilsyn.

Det er viktig at forebyggende brannvern i privat regi inngår som en del av en bedrifts internkontrollsystem. Det er egne krav til branndokumentasjon, men dersom dette kommer i tillegg til internkontrollsystemet, vil det være vanskelig å inkludere brannvern som en del av den daglige driften av en bedrift. Det forebyggende brannvernet må inneholde [96]:

- Risikovurdering av bygg eller bedrift
- Risikovurdering av aktivitet i bygg eller bedrift
- Oversikt over brannteknisk utstyr
- Kartlegge feil og mangler
- Utbedringsplan for feil og mangler
- Vedlikeholdsplan
- Øvelsesplan

De fleste ansatte vil ha et visst forhold til opplæring og øvelser, men det forebyggende arbeidet vil svært ofte være overlatt til noen enkelte personer i bedriften. Ved å inkludere brannvern i internkontrollsystemet, vil det komme tydeligere frem når det er behov for å fokusere på brannvern.

I forbindelse med organisatoriske tiltak er risikovurderinger viktige. Ved endret risiko kan det være behov for å iverksette organisatoriske tiltak før mer permanente tiltak iverksettes. Dette kan f.eks. være ved annen bruk av bygget enn tiltenkt. Ved store arrangement på skoler, kan det være behov for økt bemanning for å ivareta sikkerheten ved et arrangement. Et annet eksempel kan være bortfall av sikringstiltak som f.eks. sprinklersystem som tilsier at andre tiltak ivesettes inntil sprinklersystemet er operativ igjen.

15.3 Teknisk brannvern

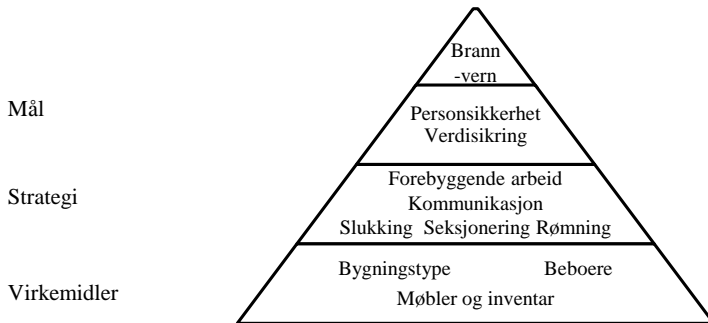
Dersom det oppstår en brann, vil det være behov for å iverksette forskjellige tiltak. Tiltakene vil variere fra bygg til bygg, og en av de viktigste funksjonene av forebyggende brannarbeid vil være å identifisere mulige scenarier og forebygge disse. I figur 15.2 er det satt opp en matrise som skisserer hvilke aktiviteter som må igangsettes dersom det har oppstått en brann i et bygg.

I enhver brannsituasjon vil personsikkerhet være høyest prioritert. Det er derfor helt sentralt å få detektert brannen og alarmere dem som oppholder seg i bygget. Samspillet med det forebyggende brannvernsarbeidet er igjen viktig ved at brukerne av bygget er opplært til å rømme bygninger når brannalarmer utløses, samt at forholdene må være lagt til rette for rømning. Deteksjonssystemet er også sentralt idet det gir signaler til slukkesystem og røykontrollsystem om å aktivere, samt at dører må stenges.

Dersom en brann ikke blir kontrollert og nedkjempet, vil den ha mulighet til å spre seg til andre deler av bygget. I denne forbindelsen er det viktig at bygget er seksjonert, dvs. oppdelt slik at brannen kun får spredt seg til et mindre område. I de tilfeller de tekniske brannvernstiltakene ikke virker tilfredstillende eller ikke er installert, må brannvesenet ha mulighet til å gå inn i bygget og slukke brannen manuelt. Seksjonering og passivt brannvern er viktige deler av brannbeskyttelsen også for brannvesenet. Seksjonering gjør at brannarealet begrenses og dermed lettes slukkearbeidet for brannvesenet. Videre gjør den passive brannbeskyttelsen det tryggere for slukkemannskapene ved at bygget opprettholder sin bærende funksjon.

15.4 Oppsummering

For å kunne oppnå et tilfredstillende nivå for brannsikkerhet i et bygg, er det flere forhold og system som må samspille. I figur 15.3 er det skissert opp hvilke mål, strategier og virkemidler som kan benyttes for å få tilstrekkelig brannsikkerhet. Hvilke tekniske systemer og virkemidler som skal brukes, vil variere fra bygg til bygg. Det er viktig å ta hensyn til bruken av bygget, hvilke personer som er sannsynlige brukere av bygget, samt utformingen av bygget.



Figur 15.3: Mål, strategi og virkemidler for brannvern.

Kapittel 16

Branndeteksjon

Et av de viktigste aspektene ved brannvern, er å oppdage at det brenner i et bygg eller i et område. Oppdagelsen av brannen må baseres på tekniske systemer¹ fordi mennesker ikke alltid er i stand til oppdage brannen. I mange tilfeller er det ikke personer i det området hvor det brenner. Eventuelt at de personene som er i området ikke er i stand til å oppdage brannen fordi de sover eller er redusert på annen måte. Deteksjonen av brannen må skje så tidlig som mulig slik at personer i området kan bli varslet og aktive brannvernstiltak kan iverksettes.

Før selve deteksjonsmetodene beskrives, er det viktig å få en forståelse for hvilken rolle branndetektorer spiller i et brannalarmanlegg. Dette kapitlet vil først ta for seg automatiske brannalarmanlegg. Videre vil følgende detektorer bli beskrevet:

- Varmedetektor
- Røykdetektor
- Flammedetektor

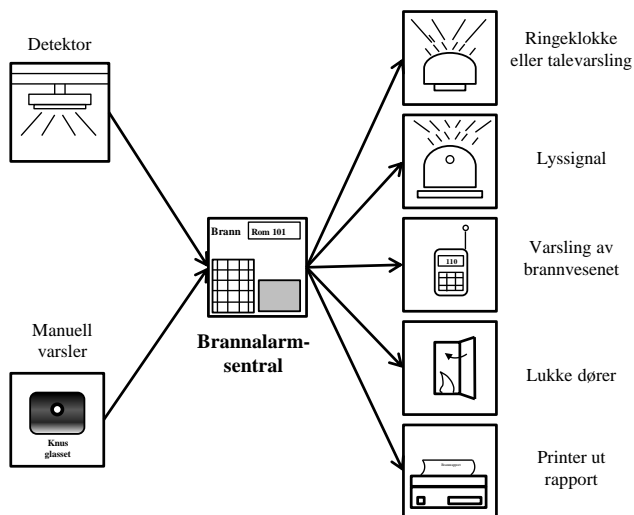
16.1 Automatisk brannalarmanlegg (ABA)

Automatisk brannalarmanlegg (ABA) består av en rekke komponenter med forskjellige funksjoner. Antallet komponenter er avhengig av anleggets størrelse og kompleksitet. I figur 16.1 er det skissert et enkelt anlegg som inneholder de fleste deler et brannalarmanlegg vil bestå av.

Komponenter i brannalarmanlegg som detekterer brann blir kalt detektorer. Det finnes forskjellige typer detektorer som reagerer på forskjellige forbrenningsprodukt fra brann. De forbrenningsproduktene som vanligvis benyttes ved deteksjon av brann er varme, røyk og elektromagnetisk stråling² fra flammene [14]. I tillegg kommer forskjellige gasser som produseres av brannen, men i nåværende detektorer blir disse ikke benyttet i særlig stor grad. Detektorene har bestemte grenser for hvor store mengder varme, røyk

¹Disse tekniske systemene omtales som brannalarmanlegg, og oppdagelsen av brannen omtales som deteksjon.

²Vanligvis omtales disse som varmestråling.



Figur 16.1: Prinsippskisse av et brannalarmanlegg.

eller stråling det kan være i et rom før detektorene sender ut signal som indikerer at det brenner. Signal fra detektorene blir sendt til en brannalarmsentral³ for videre behandling. For at signalene fra detektorene skal nå brannalarmsentralen, må det benyttes en komponent som overfører signalene. Komponentene som benyttes til signaloverføringen er som regel vanlige elektriske ledninger, men det eksisterer system som benytter rør med trykkluft⁴, radiosamband eller fiberoptiske ledninger [14].

Brannalarmsentralen er det elementet i anlegget som kommuniserer med omverdenen og varsler om at en eller flere detektorer har gått i alarm. Ved et branntilfelle har brannalarmanlegget vanligvis følgende tre hovedoppgaver, i tillegg til deteksjon:

- Varsle internt: dvs. utløse brannalarmen i bygget hvor det brenner.
- Varsle eksternt: dvs. varsle brannvesenet eller vaktsselskap.
- Aktivisere forskjellige automatiske systemer som hindrer brann- og røykspredning.

For å øke brannalarmanleggenes pålitelighet, er det blitt vanlig å legge inn rutiner for å sjekke om det virkelig brenner eller om det er falske alarmer. Dette kan for eksempel bli gjort ved at det foreligger signal fra flere detektorer, eller ved at signalet fra en detektor går igjen over tid. Det kan også legges inn tidsforsinkelser slik at personalet i et bygg kan undersøke om det brenner. Dette er vanlig i hotell og sykehus.

³Brannalarmsentral blir også omtalt som sentralapparat. Se www.kbt.no.

⁴Dette er utdatert og blir ikke benyttet i dag.

Som det går frem av avsnittene ovenfor, er det ikke tilstrekkelig kun å oppdage en brann. Det er en rekke komponenter som alle må virke for å få varsle om branntilfellet. Resten av dette kapitlet vil bli brukt til å beskrive de vanligste metodene som benyttes for å detektere brann.

16.2 Varmedetektor

Varmedetektor er den eldste typen av branndetektorer. Alt i 1860-årene ble varmedetektorer brukt, da som deler i sprinklersystemer [14]. Fremdeles er sprinklerhode den mest brukte detektor som bruker varme som deteksjonsmiddel, men andre typer er og har vært på markedet.

Varmedetektorer reagerer på oppvarming av luften som ligger omkring detektoren. Oppvarmingen av luften skjer i brannen eller i røyksoylen som brannen skaper. Røyk og varm luft transporteres fra brannen og til stedet hvor detektoren er lokalisert [10]. Den varme luften vil varme opp et element i detektoren. Oppvarmingen av elementet i detektoren vil resultere i en hendelse som igjen fører til at detektoren sender ut et signal som tilsier at det er en brann i området. Varmedetektorer opererer ut fra to forskjellige deteksjonsprinsipper [10]: Maksimumstemperatur og Temperaturdifferensial.

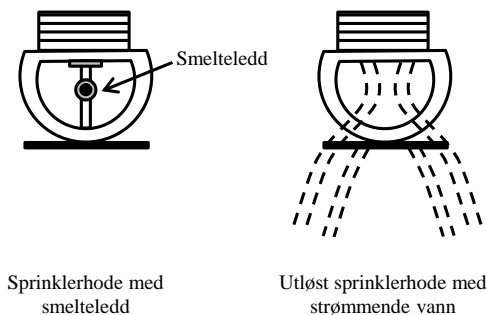
Detektorer med en maksimumstemperaturgrense vil gi alarm når temperaturen i luften omkring overstiger en fastsatt temperatur. Sprinklerhoder er gode eksempler på detektorer som utløses når maksimumstemperaturen overstiges [14]. Det er forskjellige måter å lage detektorer som benytter maksimumstemperatur for deteksjon. Noen detektorer ødelegges som følge av påvirkningene fra varm røyk. Andre detektorer kan brukes på nytt, så lenge det ikke er oppstått andre skader på detektoren [14].

De detektorene som ikke kan restaureres etter en alarm, har et element som smelter når det blir utsatt for varme. På sprinklerhoder er det et smelteledd som smelter når det er utsatt for høye temperaturer. I praksis kan temperatur over $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ være tilstrekkelig [11]. Når smelteleddet⁵ smelter vil det svekkes, og vann under trykk vil skyve ut et deksel i sprinklerhodet slik at vannet kan strømme fritt. Dette er skissert i figur 16.2. Lignende metoder blir også brukt i ordinære detektorer. Her holder smelteleddet en metallfjær på plass. Når smelteleddet svekkes, vil fjæren være i stand til å lukke en elektrisk krets og en alarm utløses. Det at smelteleddene ødelegges ved en brann, medfører at både sprinklerhoder og detektorer må skiftes ut etter utløst alarm [10].

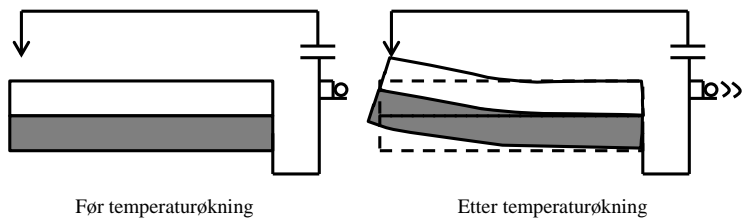
Restaurerbare detektorer reagerer også på brannen, men disse vil vende tilbake til sin opprinnelige posisjon når detektoren avkjøles etter brannen. Detektorer som benytter metoden med maksimumstemperatur for å oppdage branner, bruker i mange tilfeller to metallplater som er forbundet med hverandre. Disse metallplatene ekspanderer forskjellig ved økt temperatur. Fordi metallplatene er forbundet med hverandre, vil de bøye seg i retningen av metallet med minst termisk ekspansjonstall [14]. Ved tilstrekkelig oppvarming, vil metallplatene ha utvidet seg slik at de vil treffe en kontakt. Dermed sluttes en elektrisk strømkrets og en alarm utløses. Dette er skissert i figur 16.3.

Det er også detektorer som bruker temperaturdifferensial til å detektere brann. Tempe-

⁵I sprinklerhodet kan smelteleddet erstattes med en glassampull som sprekker ved en gitt temperatur.



Figur 16.2: Skisse av sprinklerhode.



Figur 16.3: Bi-metallisk plate som utvides ved varmetilførsel.

naturdifferensial-metoden tar utgangspunkt i at temperaturøkningen i rom med brann er større enn endringer i temperaturen under normale forhold. Forskning viser at i et brannrom vil det være en temperaturendring på 7 til 8 °C pr. minutt. Ved vanlig bruk av rommet vil temperaturendringene ikke overstige 6 °C pr. minutt [72]. Ved at detektoren kan kompensere for mindre temperaturøkninger, reduseres muligheten for falske alarmer. Faren er selvfølgelig at brannen utvikler seg så sent at temperaturøkningen ikke overstiger det som kan oppstå ved vanlig bruk av det aktuelle rommet. De fleste detektorene med temperaturdifferensial benytter derfor også en maksimal temperatur, for å være sikret deteksjon.

I forbindelse med varmedeteksjon er det også benyttet termoelement. Et termoelement vil avgi forskjellig elektrisk spenning avhengig av hvor varmt termoelementet er. Denne spenningen kan brukes til å bestemme hvorvidt det brenner i et rom eller ikke. Den følge av at det er en spenning som leses av, kan både maksimumstemperatur og temperaturdifferensial benyttes ved bruk av termoelement.

Varmedetektor er den type detektor som gir senest alarm [14]. Grunnen til den sene alarmen er elementet i detektoren som må varmes opp før det blir gitt alarm. P.g.a. den sene utløsningen av alarmen, bør det vurderes nøye før varmedetektorer blir brukt i områder hvor personsikring er brannalarmanleggets primære oppgave. Et eksempel på sted hvor det ville være uakseptabelt å installere en varmedetektor, er på rom i aldershjem. Dersom det begynner å brenne i et rom, vil personene som oppholder seg i rommet dø av røykforgiftning før varmedektoren detekterer brannen. Videre ville brannen kunne bli så stor, at den ville utgjøre en trussel for personer i andre rom.

Selv om varmedektoren er sen til å oppdage branner, er det tilfeller hvor den kan brukes med fordel. Steder hvor det er mye damp og os, kan med fordel utstyres med varmedetektorer. F.eks. på kjøkken vil det ofte være os o.l. som vil utløse mange falske alarmer dersom det blir brukt røykdetektorer.

At det er element som må varmes opp i detektoren før alarmen utløses, gjør at det skal mye til før varmedetektorer gir falsk alarm⁶ [14]. Erfaring viser at varmedetektorer er den type brann-detektor som gir færrest falske alarmer. Det er også relativt lite vedlikehold av varmedetektorer.

16.3 Røykdetektor

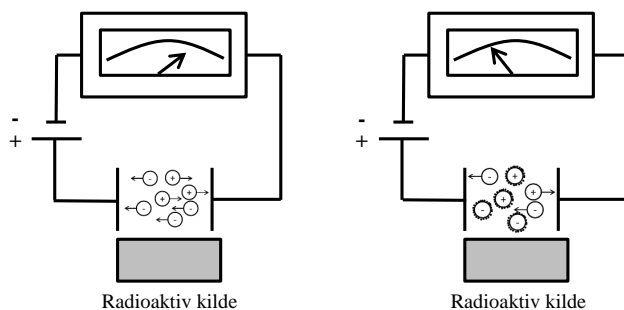
Røykdetektorer reagerer på røyk som blir produsert av brann. Detektoren utløser alarm ved en viss økning av antall partikler i luften. Hvor stor økningen i partikkelantallet må være, vil variere fra detektor til detektor. Økningen er bestemt av detektorens installatør eller produsenten. De to vanligste typene røykdetektorer er ioniske og optiske detektorer.

Røykdetektorer blir ofte kalt røykvarslere, men dette er ikke korrekt. En røykvarsler består av detektor, alarmgiver og strømkilde. En røykdetektor er en del av en røykvarsler, og disse begrepene må ikke forveksles.

⁶Termoelement varmes relativt mye fortere opp enn tradisjonelle varmedetektorer og vil dermed detektere en brann hurtigere.

16.3.1 Ionisk røykdetektor

Ioniske røykdetektorer bruker en radioaktiv kilde til å ionisere luften i et kammer i dektoren [14]. Den ioniserte luften gjør det mulig å sende elektrisk strøm mellom to elektroder. Når røykpartikler kommer inn i kammeret i dektoren, vil røykpartiklene feste seg til de ioniserte luftmolekylene og redusere mengden elektrisk strøm. Når strømmengden er tilstrekkelig redusert, vil det bli utløst en alarm. Detektortypen er illustrert i figur 16.4.



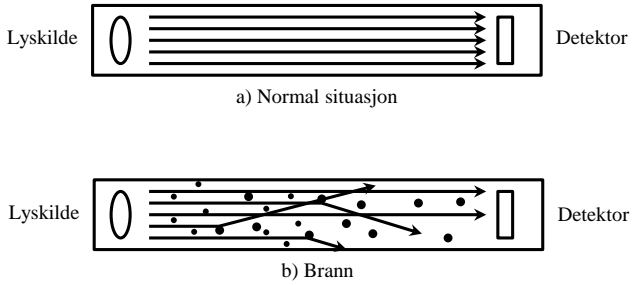
Figur 16.4: Prinsippkisse av ionisk detektor.

Det bør nevnes at den radioaktive kilden sender ut α -partikler. Disse partiklene er så energisvake at de vil bli stoppet av plasten som ligger rundt den radioaktive kilden [51].

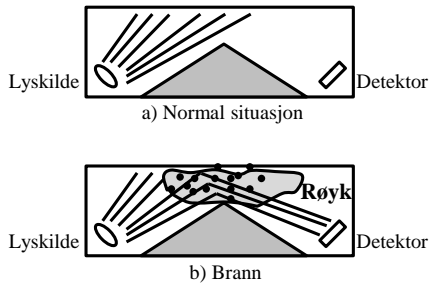
16.3.2 Optisk røykdetektor

Optiske røykdetektorer benytter to metoder for å påvise branner: lysdempning og -spredning [14]. I en detektor som bruker lysdempningsmetoden vil det være en lysstråle som kontinuerlig belyser en fotocelle. Idet røyk blir introdusert i lysstrålen, vil mengden lys som treffer fotocellen reduseres. Når lysmengden er tilstrekkelig redusert, vil dektoren tilkjenne at det er en brann i området og sende et signal til brannalarmanlegget [14]. Detektortypen er illustrert i figur 16.5. Denne metoden blir benyttet for å dekke store områder med en detektor. Området kan være et lager o.l. Detektorene blir da gjerne kalt linjedetektorer [10]. Men detektorprinsippet kan også benyttes i vanlige punkt detektorer.

Når lysspredning er brukt i røykdetektorer er det fremdeles en lyskilde i dektoren, men fotocellen er skjermet fra lyskilden [14]. Idet røyk blir introdusert i dektoren, vil røykpartiklene bli truffet av lyset fra lyskilden og reflektere deler av dette lyset ned på fotocellen. Se figur 16.6. Når fotocellen blir tilstrekkelig belyst, vil dektoren sende et signal til brannalarmanlegget om en brann [10].



Figur 16.5: Prinsippskisse av lysdemping.



Figur 16.6: Prinsippskisse av lysspredning.

16.3.3 Praktiske forhold ved røykdeteksjon

Røyk som produseres når det brenner, vil være forskjellig sammensatt avhengig av brannforløpet. Flammebranner produserer røyk med mange små partikler, mens ulmebranner avgir røyk med relativt færre men større partikler [14]. Forskning viser at ioniske detektorer reagerer bedre på røyk fra flammebranner enn ulmebranner [14]. Dette har sammenheng med at de små røykpartiklene fra flammebranner i større grad binder seg til den ioniserte luften enn det større partikler gjør. På lik linje reagerer optiske detektorer best på ulmebranner fordi store røykpartikler påvirker lysstrålen i detektoren i større grad enn det mindre partikler gjør.

Det at ioniske og optiske detektorer reagerer raskest på forskjellig type brann, kan ha betydning for deteksjonstiden. I de fleste branntilfeller vil detektortype ha relativt liten praktisk betydning m.h.t. deteksjonstid. Deteksjonstidene mellom ioniserende og optiske detektorer måles i sekunder. Ved valg av detektortype vil pris og antall falske alarmer være avgjørende faktorer, ikke deteksjonstid. Når det gjelder personsikring, vil det allikevel være mest naturlig å bruke på optiske detektorer. Dette fordi optiske detektorer ofte detekterer ulmebranner betydelig raskere enn ioniske detektorer, og dermed kan gi alarm for personer er omkommet p.g.a. røykforgiftning.

16.4 Flammedetektor

Flammedetektorer reagerer på elektromagnetisk stråling eller varmestråling fra brann. Strålingen kommer vanligvis fra brannens flammer, men kan også komme fra glør, røyk ol. dersom intensiteten er tilstrekkelig. Strålingens intensitet er viktig for flammedetektorene. Derfor må detektorene i stor grad kunne "se" brannen uhindret, for å kunne detektere brann så hurtig som mulig [10, 14].

16.4.1 Infrarød flammedetektor

Infrarøde flammedetektorer reagerer på infrarød stråling fra flammer og andre strålingskilder. Bølgelengdene til infrarød stråling⁷ som benyttes ved deteksjon ligger i området 8 500 til 70 000 Angstroms. Infrarøde flammedetektorer blir benyttet for å detektere branner i store områder som hangarer, lagre o.l. [10, 14].

Detektoren kan benytte hele det infrarøde spekteret for å detektere brann. Det har dessverre vist seg at kun bruk av strålingens bølgelengde og intensitet ikke er tilstrekkelig for å hindre uønskede alarmer. For å forbedre detektorene, er det blitt vanlig å bruke filter for å hindre effekt fra solstråling. Det er også funnet at flammer flakker med en frekvens på 5 til 30 Hz. Ved å bruke denne flakkingen kan detektoren skille mellom brann og andre fenomen [10, 14].

⁷Synlig lys ligger mellom 3000 og 7000 Angstroms. 1 Angstroms tilsvarer 10^{-10} m.

16.4.2 Ultrafiolett flammedetektor

Ultrafiolette flammedetektorer detekterer stråling fra flammer med bølglengde mindre enn 3 000 Angstroms. UV-detektorene blir lett påvirket av stråling fra lyn og sveising, noe som medfører at detektorene må ha mekanismer som hindrer alarm ved kort lysglimt. Det må også være mekanismer som hindrer alarm ved lys som flakker med en annen frekvens enn det flammer gjør. Detektorene som benytter UV-stråling må også være lokalisert relativt nær eventuelle branner p.g.a. detektorenes sensitivitet til intensiteten av UV-strålingen [10]. P.g.a. vansker med stråling fra andre kilder enn flammer, blir denne type detektor benyttet til deteksjon av brann og eksplosjon i mindre rom og små beholdere som er beskyttet mot UV-stråling fra omgivelsene [10, 14].

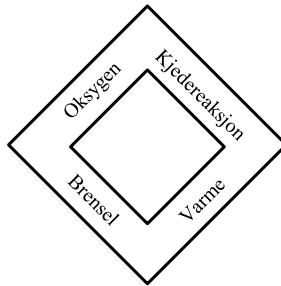
Kapittel 17

Brannslukking

For å kunne begrense verditap ved brann, er det viktig å begynne slukkearbeidet så tidlig som mulig i brannforløpet. Dette kapitlet vil beskrive slukketeori, samt gi en enkel innføring i vanlige slukkemidler og -systemer.

17.1 Slukketeori

Slukking og forbrenning er to beslektede emner. Tidligere i boken er det blitt diskutert hvordan brann oppstår og forbruker tilgjengelig brensel. For å beskrive forbrenning i brann, ble begrepet brannfirkant introdusert. Denne firkanten inneholder de fire elementene som må være tilstede for at det skal kunne brenne, se figur 17.1. De fire elementene¹ er: brensel, oksygen, varme og frie radikaler (kjedereaksjon).



Figur 17.1: Brannfirkant.

Slukking går i all enkelhet ut på å fjerne ett av de fire elementene som blir beskrevet i brannfirkanten. Hvordan elementene fjernes er avhengig av egenskapene til slukkemidlet

¹De fire elementene i brannfirkanten er beskrevet mer detaljert i kapittel 11 om brannkjemi.

som benyttes. Slukkemidlets egenskaper er også avgjørende for i hvilken grad det er i stand til å slukke en gitt type brann. Et eksempel er vann som har større tetthet enn olje. Dette betyr at vann vil synke i olje og kjøler ikke oljens overflate. Det vil derfor være svært vanskelig å slukke en oljebrann ved kun å bruke vann.

I det neste avsnittet vil momenter for valg av slukkemidler bli diskutert. Videre vil noen slukkemidlers egenskaper bli beskrevet nærmere i de følgende kapitlene.

17.2 Valg av slukkemiddel

Slukkemidler har ulike slukkeegenskaper og kan benyttes til slukking av forskjellige typer branner. Hvilket slukkemiddel som benyttes, må bestemmes med bakgrunn i brenselstype og hvilke sekundære skader som kan aksepteres [82].

Ved valg av slukkemiddel og slukkesystem, må det bli tatt hensyn til en rekke faktorer. Disse faktorene er bl.a. hvilken type brann som forventes i et område, hvem som oppholder seg i området og som eventuelt skal bruke utstyret. Nedenfor vil det bli gitt noen forhold som må vurderes når slukkesystem skal velges. Listen er ikke utfyllende, det må være opp til den enkelte å vurdere om det er spesielle forhold som må undersøkes nærmere før valg blir gjort.

17.2.1 Vurdere brensels- og branntype

Før det blir bestemt hvilket slukkesystem som skal installeres i et område, må det bli foretatt en vurdering av hvilke typer branner som kan forventes. Hvilke typer brensel det er i et område kan være en god indikator på branntype: papir og treverk, hydrokarboner i væskeform, gasser, metaller etc. Ikke alle typer slukkemiddel er like godt egnet til å slukke alle typer brann. Et eksempel er vann som ikke er godt egnet til å slukke hydrokarbonbranner. I tabell 17.1 er det satt opp en oversikt over brenselstyper og slukkemiddelklasser [18]. Denne tabellen kan brukes ved vurderinger av aktuelle slukkemidler.

Tabell 17.1: Slukkemidler for forskjellige brensler.

Slukkemiddel	Brensel
Klasse A	Faste organiske materialer som tre, papir, tekstiler etc
Klasse B	Brannfarlige væsker som bensin, olje, lakk, maling etc.
Klasse C	Brannfarlige gasser som propan, butan, metan etc.
Klasse D	Metaller (lite brukt)
Klasse F	Matoljer og frityr

Den tidligere klassen for slukkemidler for elektrisk utstyr (Klasse E) er ikke lengre i bruk.

17.2.2 Sekundærskader

Det må også bli gjort en vurdering av hvorvidt slukkemiddelet som er valgt, er i stand til å påføre utstyr eller andre gjenstander² i området sekundærskader. Dersom skader kan oppstå, må det undersøkes hvorvidt andre slukkemidler kan benyttes. Svært ofte vil slukkesystemet skade utstyr i beskyttelsesområdet. Det må derfor gjøres avveininger om brann eller slukkesystem gir de verste skadene. Undersøkelser viser at skadene fra slukkesystemet vanligvis er mindre enn skadene som oppstår som følge av brann, røyk og slukkeinnsats fra brannvesenet.

Ny taktisk tenkning innen brannvesenet sier at det skal fokuseres på hva som skal reddes og ikke bare på at brannen skal slukkes [29]. Denne type tenkning krever et større fokus på sekundærskader enn tidligere.

17.2.3 Vurdere person- og miljø sikkerhet

Person- og miljø sikkerhet er to sentrale forhold som må avklares før valg av slukkemiddel blir tatt. Det kan bli valgt et slukkemiddel som utgjør en fare for personer, uten at dette nødvendigvis går ut over personsikkerheten, men da må det iverksettes tiltak for å ivareta sikkerheten til dem som er i området hvor slukkemidlet skal benyttes.

Et godt eksempel på slukkemidler som er i bruk, og som kan utgjøre en personfare, er karbondioksid (CO_2). Når CO_2 skal benyttes, må det brukes utstyr for å hindre at personer blir skadet som følge av inhalering av gassen. Disse tiltakene går ut på å advare dem som er i området hvor CO_2 -gassen slippes ut, samt at det er en tidsforsinkelse i utslippet av gass. Med både advarsel og tidsforsinkelse skal personer i området ha tid til å romme før gassen slippes ut. Det viser seg allikevel at CO_2 -anlegg ikke utløses p.g.a. uklare situasjoner for personer i området som skal beskyttes. Et eksempel er brannen i motorrommet til Hurtigruten Nordlys i 2011. Her var det to medarbeidere fra mannskapet som ikke var gjort rede for, og derfor ble ikke CO_2 -anlegget i motorrommet utløst og skadeomfanget tilsvarende større [87]. Alternative slukkegasser og vanntåke bør derfor vurderes.

Miljø sikkerhet er også blitt et viktig kriterium for valg av slukkesystem. Halon er en type slukkemiddel som er forbudt å bruke p.g.a. effekten komponenter i halon har på ozonlaget. De slukkemidlene som brukes skal heller ikke bidra til oppvarmingen av atmosfæren i større grad. Viktigheten av å beskytte miljøet er blitt opp-prioritert siden 1990, og dette er blitt en viktig rammebetingelse for bruk av slukkemidler.

Produsenter av slukkemidler må ivareta kravene om at slukkemidlene ikke er skadelige for ozonlaget, og at de ikke bidrar til global oppvarming. Derimot er det den enkelte eier av slukkesystem som er ansvarlig for at slukkemidlene som brukes ikke forårsaker lokale skader. Vann fra sprinklersystem eller brannvesen, kan lett transportere miljøgifter vekk fra brannstedet og til områder hvor mennesker og dyr kan skades. Denne form for miljøskader er ikke blitt fokusert på, men det må være vurdert når valg av slukkemidler og andre tiltak bestemmes.

²Gjenstander som ikke tåler sekundærskader kan f.eks. være gjenstander i museum, bøker på bibliotek eller maleri på vegger i stavekirker.

17.2.4 Tilgjengelighet av slukkemiddel

En viktig forutsetning for å drive med slukkearbeid, er at både slukkestyr og slukkemiddel er tilgjengelig. Tilgjengeligheten kan påvirkes av en rekke forhold. Et av de viktigste forholdene er oppbygningen av selve slukkesystemet. En rekke pulver- og gass-system er laget slik at dersom de blir utløst, vil alt slukkemiddel bli frigitt. Når slukkemidlet er oppbrukt, er systemet ikke i stand til å bekjempe nye branner før nytt slukkemiddel er blitt tilført. Dette kan være et alvorlig problem dersom en brann blusser opp etter at slukkesystemet er aktivert. Hvor lang tid det tar for å erstatte slukkemidlet er systemavhengig, men i de fleste tilfeller vil slukkesystemet være ute av drift i mange timer eller dager.

Det er også andre forhold som kan påvirke tilgjengeligheten, men disse forholdene er systemavhengige. Et eksempel er at vann fryser ved 0 °C. Dersom slukkesystemet skal operere i kalde omgivelser, må det bli tatt hensyn til at vannet kan fryse. Et annet eksempel er at pulver kan klumpe seg ved tilførsel av vanddamp. Hensyn til systemavhengige forhold, må bli ivarettatt ved utforming av det enkelte systemet.

17.3 Vann

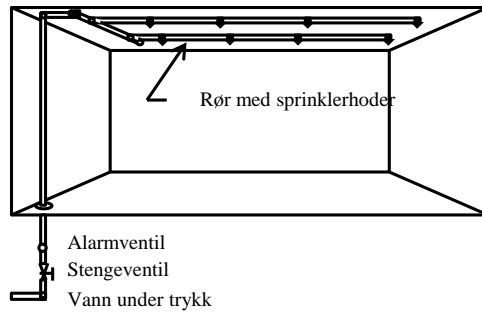
Vann er det slukkemiddelet som oftest blir brukt ved brannslukking. Vann har egenskaper som gjør at flere av metodene for slukking blir tatt i bruk. Når vann varmes opp og fordampes, vil det bli tatt opp store mengder energi. Dersom vann ved 5 °C varmes opp til 100 °C og fordampes, må det tilføres 2655 kJ/kg [40]. Energien som blir tatt opp av vannet, vil bli tatt fra brensel eller flamme som igjen avkjøles [10]. Ved tilstrekkelig avkjøling vil avgivelse av brennbare gasser fra brenselet stoppe opp.

Ved oppvarming av vann, vil det også bli utviklet damp som har et mye større volum enn vann. En liter vann ved 5 °C vil utvides 1673 ganger ved omforming til damp ved 100 °C [40]. Det store volumet til dampen vil medføre fortrenning av oksygen fra forbrenningssonen [10]. Når oksygentilførselen reduseres, vil også brannens forbrenningsrate reduseres.

Hvordan vann blir tilført kan variere. I mange tilfeller er det personer eller brannkonstabler som bruker vannslanger for å tilføre vann og slukke branner, men det er også automatiske anlegg som tilfører vann. Sprinklersystem er den vanligste type automatiske anlegg som benyttes for vannpåføring, men i den senere tid har også vannåkesystem blitt tatt i bruk.

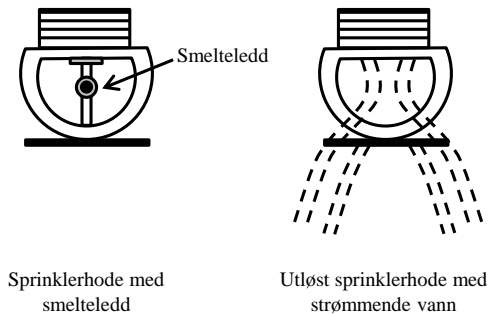
17.3.1 Sprinklersystem

Sprinklersystem tilfører vann meget effektivt, og automatiske anlegg har vært på markedet i USA siden 1860 [85]. Selve systemet består av sprinklerhoder som er forbundet med rør. I tillegg kommer ventiler som forbinder sprinklersystemet med vannkilder, se figur 17.2. Utformingen av systemet er avhengig av hvilke objekter og rom som skal beskyttes.



Figur 17.2: Sprinklersystem.

Sprinklerhodet er i prinsippet en varmedetektor som er tilkoblet et slukkesystem. En av delene i sprinklerhodet er et smelteledd (eller glassampulle), som er følsomt for varme. Når temperaturen stiger i rommet hvor sprinklerhodet er montert, vil leddet svekkes som følge av varmeoverføring. Vann under trykk i rørsystemet vil skyve ut smelteleddet slik at vannet kan strømme fritt [11]. Vannet som strømmer vil treffe en spredeplate som sprer vannet i en dusj med et paraplyformet mønster, se figur 17.3.



Sprinklerhode med smelteledd

Utløst sprinklerhode med strømmende vann

Figur 17.3: Sprinklerhode før og etter utløsning.

Dekningsområdet til et sprinklerhode varierer fra hode til hode. Et typisk dekningsareal er mellom 9 og 12 m² [11]. Det skjer fremdeles en utvikling innen sprinklerhodetechnologien, slik at sprinklerhodenes dekningsareal vil øke.

17.3.2 Vanntåkesystem

Vanntåkesystem introduserer vandråper med meget liten diameter i rom hvor det brenner. De små dråpene fordamper og slukker brannen ved kjøling og fortregning av oksygen. For å kunne definere et system som vanntåkesystem, må den maksimale dråpestørrelsen ikke overstige 1000 mikrometer [76]. Sprinklersystem vil levere noen dråper med diameter mindre enn 1000 mikrometer, men de fleste av dråpene vil ligge over grensen for vanntåke [11].

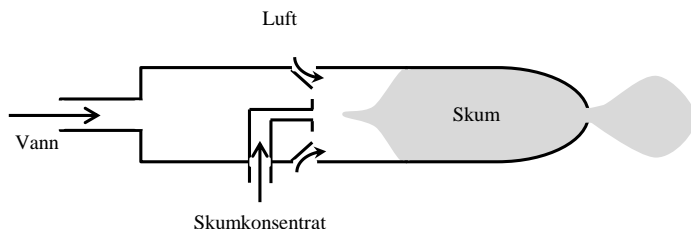
Bruken av vanntåkesystem har økt fra 1990-tallet og utover p.g.a. utfasingen av halon som slukkemiddel. Dette har sammenheng med miljøproblemene som oppstår ved bruk av halon. Vanntåke er ett av mange slukkemidler som er forsøkt brukt som halonerstatter og som også kan erstatte andre slukkegasser som f.eks. CO_2 .

17.4 Skum

Skum er en blanding av vann, luft og en skumdannende væske [78]. Den viktigste slukkeegenskapen til skum er at det former et skille mellom brensel og luft. Dette skille gjør det umulig for forbrenningen å fortsette. Denne egenskapen er spesielt viktig for væskebranner fordi skum har mindre tetthet enn brennbare væsker og flyter på disse [69].

I figur 17.4 er det skissert opp et skumrør. I røret blir vann, luft og skumkonsentrat blandet og p.g.a. turbulens i røret ekspanderer blandingen og genererer skum. Skum deles opp i tre grupper, i henhold til hvor mye skummet ekspanderer. Gruppene er [78]:

- Tungtskum - Skumtall 7 til 20.
- Mellomskum - Skumtall 50 til 200.
- Lettskum - Skumtall 500 til 1000.



Figur 17.4: Skisse av skumrør.

Skumtallet gir forholdet mellom produsert skumvolum og volumet til vann-skumvæskene som benyttes [78]. De forskjellige skumtypene egner seg til forskjellige typer branner og situasjoner. Tungtskum er seigt og tungt, og kan kastes langt. Dette gjør at skummet er godt egnet til å dekke flater fordi det forseglar disse. Mellomskum er lettere enn det tunge skummet og kan ikke kastes så langt. Skummet er meget effektivt til slukking av væskebranner fordi det flyter lettere på væskene enn tungt skum. Lettskum har ingen kastelengde og må brukes der det produseres. Det at skumtallet er meget høyt for dette skummet gjør at det er godt egnet til å beskytte større rom og objekter [78].

Det er en rekke forskjellige skumtyper på markedet. De forskjellige typene dekker mange bruksområder og har forskjellige skumtall. Det er viktig å huske at forskjellige skumdannende væsker ikke må blandes med hverandre, fordi de kan ødelegge hverandre. Videre er det også viktig å huske på at skumdannende væsker kan bli foredelt, og dermed miste sin funksjon [78].

17.5 Gass

Gass kan slukke en brann på to forskjellige måter avhengig av gassenes egenskaper. Inert gass vil ikke ta del i forbrenningen, men fortrenge oksygen fra forbrenningssonen. Andre gasser tar aktivt del i selve forbrenningen og slukker brannen ved at antall frie radikaler reduseres (inhibitor). Kjedereaksjonen i brannen blir dermed brutt [37].

17.5.1 Inerte gasser

Karbondioksid (CO_2) er et eksempel på inerte gasser³ som slukker brann ved å fortrenge oksygen fra forbrenningssonen. Gassen blir introdusert i brannområdet via høy- eller lavtrykkssystem. Gassen er svært kald når den kommer fra systemet. Selv om gassen er kald, har den liten kjølede effekt på brannen [10]. Slukkesystem som benytter karbondioksid som slukkemiddel, kan beskytte et enkelt objekt eller hele rom. Karbondioksid blir brukt til å beskytte prosesser som benytter brennbare væsker, rom med elektrisk apparatur og maskinrom [10].

Selv om karbondioksid er et effektivt slukkemiddel, har gassen en alvorlig ulempe i det den kan utgjøre en trussel for personer i beskyttelsesområdet. Karbondioksid i blodet blir brukt av mennesker for å regulere respirasjonsfrekvensen. Ved høye konsentrasjoner av karbondioksid i blodet, vil respirasjonsfrekvensen øke⁴. Når karbondioksid er tilstede i luften, vil denne også bli tatt opp i blodet. Vanskene oppstår når karbondioksid-konsentrasjonene i luft er over 7 %. Da vil sentral nervesystemet til en person bli påvirket. Personen vil miste funksjonsevner og tilsatt miste bevisstheten. Ved karbondioksid-konsentrasjoner på 10 % vil lungefunksjonene opphøre og opptak av

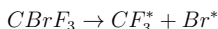
³Det er inerte gasser på markedet som ikke er så farlige i bruk som CO_2 , men de virker på samme måte overfor brannen ved å redusere oksygenkonsentrasjonen i luft. Det er også utviklet systemer som holder en konstant lav oksygenkonsentrasjon i et rom slik at en flammembrann ikke kan oppstå.

⁴Det er utviklet slukkegasser som inneholder små konsentrasjoner av CO_2 , og som aktivt bruker den økte respirasjonsfrekvensen til å øke personsikkerheten ved at personer greier å puste inn nok oksygen til å overleve.

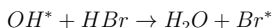
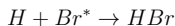
oksygen stoppe [35, 80]. Oksygenmangel vil i løpet av få minutter føre til hjerneskadene og død.

17.5.2 Inhibitor-gasser

Det er en rekke haloner, men i brannsammenheng er alle nå blitt forbudt p.g.a. det generelle forbudet mot halon. Hvordan halonene påvirker forbrenningen i brann er ikke fullstendig forstått [37]. Men det er klart at halonet inngår i forbrenningen, og reagerer med frie radikaler og bryter kjedereaksjonene. Reaksjonene for Halon 1301 ($CBrF_3$) er som følger [89]:



Brom-atomet som nå er et fritt radikal, kan reagere med for eksempel hydrogen og forme hydrogenbromid (HBr). Hydrogenbromidet kan igjen reagere med andre frie radikaler f.eks. hydroksyl-radikalet.



Halon har relativ lav konsentrasjon i brannrommet fordi den inngår i de kjemiske prosessene i brannen og fortrenger ikke oksygen. Den lave konsentrasjonen (mindre enn 5%) gjør at halon ikke utgjør en personfare. Dersom det skulle oppstå høyere konsentrasjoner av halon, kan dette bety en økt fare for dem som er i områder hvor halon frigis. I høye konsentrasjoner er alle halonene giftige [10]. Videre har også forbrenningen en viss innvirkning på giftigheten til halon. Når halon er i forbrenningssonen til en brann, vil gassen brytes ned til forskjellige komponenter. Disse komponentene kan i større eller mindre grad være giftige, og enkelte komponenter er svært giftige sammenlignet med halon [89].

17.6 Pulver

Pulver som slukkemiddel ble introdusert på 1930-tallet, men ble først en kommersiell vare på begynnelsen av 50-tallet [10]. Med tiden er det blitt utviklet en rekke pulver som slukker forskjellige typer branner.

Pulver som introduseres i en brann, vil primært slukke ved å bryte kjedereaksjonene som pågår i forbrenningssonen [10]. I tillegg til å påvirke kjedereaksjonene, vil pulver også ta opp en del varme og dermed redusere brannens varmeproduksjon. Forsøk har vist at pulver er mest effektivt ved slukking av hydrokarbon-branner. Når pulver skal vurderes som slukkemiddel, må også sekundærskader vurderes. Pulver kan skade elektrisk utstyr, samt at det er svært arbeidskrevende og dyrt å gjøre rent i områder hvor pulver er blitt brukt.

Det er utviklet system for total dekning av rom og områder, samt mindre system og håndapparat. Hvilke typer system som benyttes er avhengig av hvilken type brann som forventes, samt størrelse på brannen. Når type og størrelse på anlegg er bestemt, må det benyttes pulver som kan dekke det aktuelle behovet.

Det er utviklet en rekke forskjellige pulvertyper. I dette avsnittet er de vanligste pulvertypene beskrevet [10, 34].

Natrium-hydrogenkarbonat-pulver

Natrium-hydrogenkarbonat-pulver er den pulvertypen som først ble tatt i bruk. Den er fremdeles populær fordi den er pålitelig, effektiv og økonomisk. Pulveret er behandlet for å hindre opptak av fuktighet, samt forbedre strømmingsegenskapene. Denne pulvertypen kan ikke benyttes sammen med organisk skum og vannfilm-formende skum (AFFF) [10].

For å forbedre natrium-hydrogenkarbonat-pulver med hensyn til skum, er det blitt utviklet pulver som er behandlet med silikon. Pulveret med silikon kan brukes sammen med skum, uten at pulveret bryter ned skummet. Når pulveret ikke bryter ned skummet, kan disse to slukkemidlene brukes sammen for en hurtigere slukking av brannen, samt for å hindre fornyet antennelse [10].

Ammonium-dihydrogenfosfat-pulver

Ammonium-dihydrogenfosfat-pulver er et pulver som kan slukke forskjellige typer brann. Forsøk har vist at dette pulveret kan slukke branner i faste materialer (A-brann), brennbare væsker (B-brann) og gassbranner (C-brann) samt branner i elektriske installasjoner⁵. Pulveret blir derfor omtalt som et ABC-pulver. ABC-pulveret er det som benyttes i pulverapparatene som brukes i hjemmene våre.

ABC-pulveret kan benyttes sammen med proteinbaserte skumtyper. Videre er dette pulveret mer effektivt til å slukke væskebranner enn natrium-hydrogenkarbonat [10].

Kalium-hydrogenkarbonat-pulver

Kalium-hydrogenkarbonat-pulver er ofte omtalt som "Purple K", og er ca. to og en halv gang så effektivt til å slukke væskebranner som natrium-hydrogenkarbonat-pulver. Dette pulveret bryter ned mekaniske protein-skum, men kan brukes med AFFF. Denne type pulver er meget ofte brukt der det kan forventes væskebranner [10].

Kalium-klorid-pulver

Kalium-klorid-pulver er en videre utvikling av kalium-hydrogenkarbonat-pulver. Denne pulvertypen kan brukes i kombinasjon med proteinbaserte skumtyper. Pulveret blir også omtalt som "Super K" [10].

Urea-basert kalium-hydrogenkarbonat-pulver

Urea-basert kalium-hydrogenkarbonat-pulver blir også omtalt som Monnex, og er ca. seks ganger mer effektivt til å slukke væskebranner enn natrium-hydrogenkarbonat-pulver kilo for kilo. Monnex er også kompatibel med proteinbasert skum.

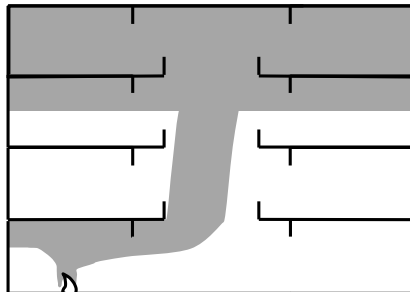
⁵ABE-pulver henger igjen fra da E-brann var relatert til elektriske apparat.

Når pulveret blir introdusert i flammesonen, vil det dekomponere og produsere store mengder små partikler med diameter under 0,01 mikron. Dette medfører at pulveret lettere kan trenge inn i flammen og bryte kjedereaksjonene, samt øke varmeopptaket [10].

Kapittel 18

Røykkontroll

Røyk som sprer seg i et bygg, kan utgjøre en stor personfare, samt forårsake store ødeleggelser p.g.a. røykskader. Røykkontroll bruker aktive og passive virkemidler for å hindre at røyk sprer seg. I denne forbindelse er det viktig å vite både hvordan røyken sprer seg og hvordan røykspredning kan hindres.



Figur 18.1: Røykspredning i et bygg.

18.1 Røykspredning

Røyk som produseres av en brann vil kunne spre seg i et bygg dersom det er trykkforskjeller og åpninger i bygningskonstruksjonen. Trykkforskjellene blir omtalt som drivkrefter. Disse drivkreftene vil transportere røyk fra områder med høye trykk til områder med lavere trykk. Transporten vil skje gjennom åpninger i bygget som for eksempel døråpninger, sprekker i vegger eller spalter rundt dører, rør eller kabler.

Forskjellige drivkrefter og former for åpninger vil bli diskutert videre i dette kapitlet.

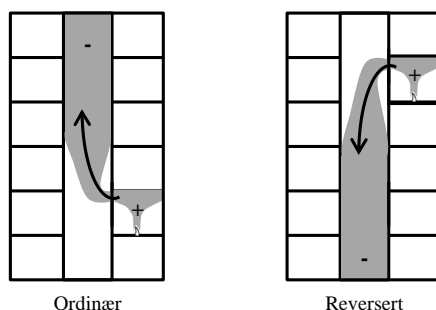
18.2 Drivkrefter

Drivkreftene i et bygg kan deles inn i to grupper. Den ene gruppen består av drivkrefter som er tilstede i bygg selv om det ikke brenner. Disse drivkreftene er: skorsteinseffekt, vindkrefter og trykkforskjeller som følge av mekaniske installasjoner i bygget, som f. eks. heis eller mekanisk ventilasjonssystem. Den andre gruppen drivkrefter forekommer først når det brenner. Disse drivkreftene oppstår som en følge av de trykkforskjellene som skapes av en brann: oppdrift og termisk ekspansjon av varme røykgasser [61]. Drivkreftene som følge av brannen vil være dominerende i områdene nær brannen. Når avstanden til brannen øker, vil de drivkreftene som ordinært er i bygget bli dominerende.

Nedenfor vil de forskjellige drivkreftene bli omtalt nærmere. Drivkreftene vil bli omtalt i henhold til hvordan de påvirker spredning av røyk og ikke hvilken gruppe de tilhører. Det er derfor naturlig å begynne med skorsteinseffekten fordi den alltid er tilstede i bygget, og fordi den og oppdrift av varme røykgasser i prinsipp er like.

18.2.1 Skorsteinseffekt

Skorsteinseffekten oppstår som følge av temperaturforskjeller mellom innsiden og utsiden av et bygg. Denne termiske effekten vil derfor i praksis alltid være tilstede i alle bygg. Der hvor det er varmere inne i bygget enn ute, vil luften i bygget bevege seg oppover. Denne naturlige oppdriften omtales som skorsteinseffekten [61, 68]. I bygg med air-condition vil det også oppstå situasjoner hvor lufttemperaturen er høyere ute enn inne. Luften i bygget vil da få en nedadgående bevegelse, og dette omtales som reversert skorsteinseffekt [61]. P.g.a. temperaturrene i Norge, vil en sjelden oppleve reversert skorsteinseffekt. Derimot vil denne effekten kunne forekomme når air-condition er brukt for å kjøle ned luften i bygg. Trykkforskjellen som forårsaker oppdriften i skorsteinseffekten, er et resultat av forskjellige tettheter i luften i og utenfor bygget [61].



Figur 18.2: Skorsteinseffekt og reversert skorsteinseffekt.

18.2.2 Termisk oppdrift av varm røyk

Varm røyk som produseres av en brann, vil ha termisk oppdrift som drivkraft. Denne drivkraften er, på lik linje med skorsteins-effekten, et resultat av forskjeller i tetthet [61].

18.2.3 Termisk ekspansjon av varm røyk

Røyk fra en brann kan utvide seg og øke sitt volum som følge av den høye temperaturen. Dersom røyken ikke har mulighet til å utvide seg fritt, vil det oppstå en trykkøkning i det rommet hvor det brenner. I forbindelse med termisk ekspansjon av varm røyk, kan det forekomme tre situasjoner. I den mest ekstreme situasjonen vil ikke røyken ha noen mulighet til å utvide seg. Dette vil medføre en kraftig trykkøkning. Det andre ytterpunktet vil være at røyken får ekspandere fritt. Dette medfører ingen trykkøkning, men en betydelig økning av røykens volum. I den vanligste situasjonen vil ekspansjonen av røyken bli noe hindret, slik at det oppstår både en svak trykkøkning og en volumøkning [68].

18.2.4 Vindkrefter

Vind vil påvirke røykspredningen i et bygg ved at det skapes over- og undertrykk rundt bygningskonstruksjonen [68]. Trykkforskjellene vil medføre at røyk vil bevege seg i bygget, samt at det kan skapes store trykkkrefter mot dører o.l.

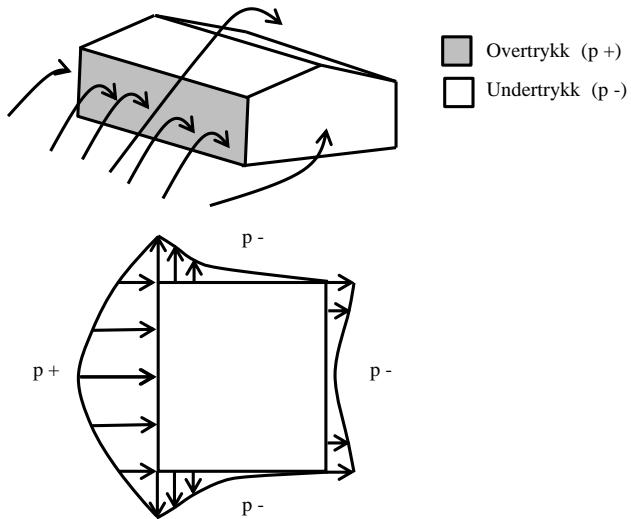
Hvor store trykk vinden skaper, er avhengig av byggets utforming og vindens hastighet. I figur 18.3 er det vist hvordan vind vil skape trykk rundt en bygningskonstruksjon.

18.3 Ventilasjonsåpninger

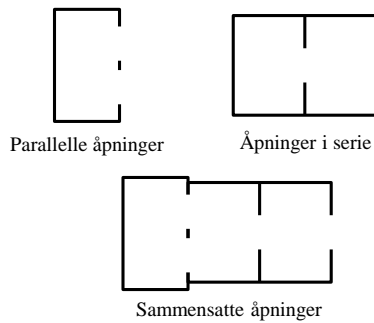
Åpningene som røyken spres igjennom, kan være utformet svært forskjellig. Det viser seg allikevel at sammensetningen av åpningene kan deles inn i to hovedgrupper [61]: parallelle åpninger og åpninger i serie. Andre sammensetninger av åpninger vil være kombinasjoner av de to hovedtypene av åpninger. Eksempler på de forskjellige sammensetningene er vist i figur 18.4.

I konstruksjoner vil det alltid være åpninger og sprekker [61]. En del åpninger som dører og vinduer, er det lett å inkludere i beregninger. Men det er også en rekke mindre åpninger som det er vanskeligere å kvantifisere og inkludere i branntekniske beregninger. Eksempler på slike åpninger kan være sprekker og gliper rundt dører, vinduer og kabelgjennomføringer, samt sprekker i tak og vegger.

Det er gjort undersøkelser for å kvantifisere mengden og størrelsen på disse mindre åpningene i forskjellige konstruksjoner. Disse undersøkelsene viser at det er en rekke mindre åpninger som må inkluderes i beregninger av røyktransport for å få riktige resultat. I tabell 18.1 er det gjengitt noen av de resultatene som fremkom under undersøkelsene av konstruksjonene [61]. Tallene er oppgitt som en andel av konstruksjonsoverflaten, og viser at det kan være betydelige åpningsareal hvor røyken kan spre seg i et bygg.



Figur 18.3: Trykkfordeling rundt et bygg p.g.a. vind.



Figur 18.4: Eksempler på forskjellige kombinasjoner av åpninger.

Tabell 18.1: Lekkasjeareal for kommersielle bygg [61].

Konstruksjon	Tetthet	Arealforhold
Utvendig vegg (Dette inkluderer åpninger rundt dører vinduer og i veggen)	Tett	$5,0 \cdot 10^{-5}$
	Gjennomsnitt	$1,7 \cdot 10^{-4}$
	Åpne	$3,5 \cdot 10^{-4}$
	Veldig åpen	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Vegg i trapperom (Inkluderer åpninger i vegger, men ikke rundt dører og vinduer)	Tett	$1,4 \cdot 10^{-5}$
	Gjennomsnitt	$1,1 \cdot 10^{-4}$
	Åpen	$3,5 \cdot 10^{-4}$
Vegg i heissjakt (Inkluderer åpninger i vegger, men ikke rundt dører og vinduer)	Tett	$1,8 \cdot 10^{-4}$
	Gjennomsnitt	$8,4 \cdot 10^{-4}$
	Åpen	$1,8 \cdot 10^{-3}$
Gulv (Inkluderer åpninger i gulv, og åpninger rundt gjennomføringer)	Tett	$6,6 \cdot 10^{-6}$
	Gjennomsnitt	$5,2 \cdot 10^{-5}$
	Åpen	$1,7 \cdot 10^{-4}$

18.4 Prinsipp for røykkontroll

Røykkontroll deles i to grupper: aktive og passive tiltak. For aktive røykkontrollsystem brukes det vifter o.l. for å skape trykkforskjeller i et bygg. Disse trykkforskjellene gjør at røyken transporteres kontrollert i bygget. Passive systemer benytter de termiske oppdriftskreftene fra brannen til å transportere røyken. Forskjellige aktive og passive røyktransportmetoder er beskrevet i dette kapitlet.

Før de enkelte røykkontrollsystemene blir beskrevet nærmere, er det viktig å ha en forståelse for bruken av disse systemene. Røykkontroll blir i hovedsak benyttet for å øke sikkerheten til personer i byggene hvor disse systemene blir benyttet [61, 68]. Ved å kontrollere røykspredningen, vil personer som rømmer et bygg ha større muligheter til å komme seg i sikkerhet. Personersikkerhet er viktig i de første delene av et brannforløp, fordi det fremdeles er personer i bygget. Etter hvert som bygget evakueres, vil fokus bli rettet mot å sikre bygget. Røyken fra en brann kan spres hurtig i flere etasjer. Med bakgrunn i at det som oftest er gasser i røyken som medfører død, er det viktig å ventilere røyken slik at den ikke kan skade personene i bygget [61, 68].

18.4.1 Aktiv røykkontroll

I aktiv røykkontroll blir det benyttet tre prinsipper: trykksetting, forsert avtrekk og motstrøm [61, 68]. Drivkreftene ved aktiv røykkontroll blir laget ved å bruke viftene i byggets ventilasjonssystem. Disse tre prinsippene blir forklart nedenfor.

Trykksetting

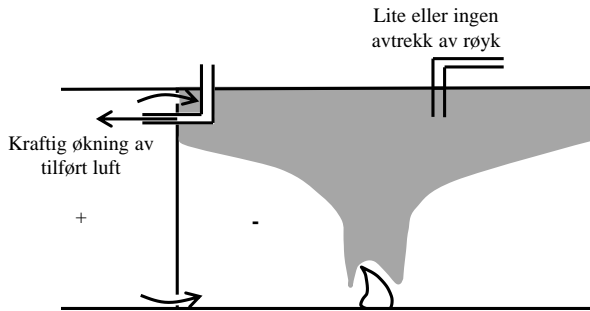
Ved brann i et rom vil det bli produsert varm røyk. Den varme røyken vil skape overtrykk som følge av tetthetsforskjeller. Prinsippet ved trykksetting går ut på å sette de omliggende rommene til brannrommet under trykk, slik at disse rommene har et høyere trykk enn brannrommet. Det høyere trykket vil hindre at røyk transporteres fra brannrommet til omliggende rom. Selve trykksettingen oppnås ved at ventilasjonssystemet øker tilførselen av luft til de omliggende rommene og stopper tilførselen av luft til brannrommet, se figurene 18.5 og 18.6.

Forsert avtrekk

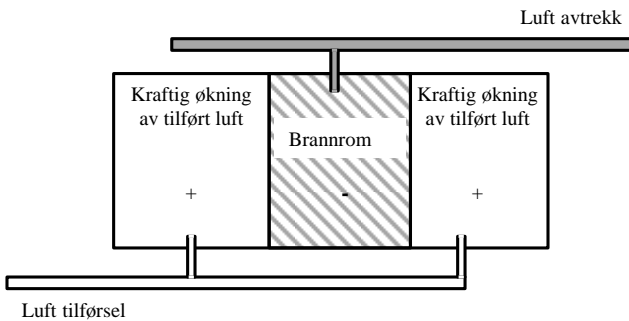
I røykventilasjonssystem som bruker forsert avtrekk, blir raten av luft som ventileres ut av brannrommet økt betraktelig. Samtidig stopper ventilasjonssystemet tilførselen av frisk luft til brannrommet, se figur 18.7. I de omliggende rommene til brannrommet fortsetter ventilasjonssystemet å tilføre frisk luft, men avtrekkene i disse rommene blir stengt. Den økte utluftingen av brannrommet vil skape et undertrykk som forhindrer røyken i å spre seg til omliggende rom, se figur 18.8.

Motstrøm

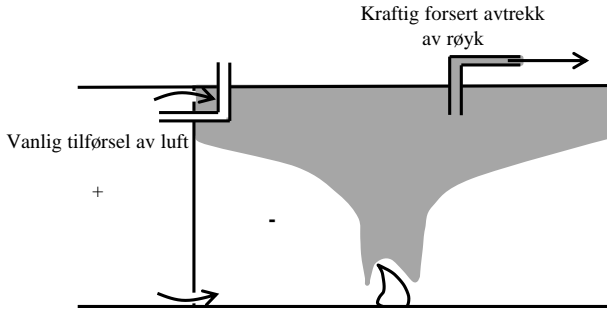
Motstrøm er et resultat av trykkforskjeller. Men i motsetning til trykksetting og forsert avtrekk, er det ikke selve trykket som drivkraft som benyttes. Ved motstrøm blir det



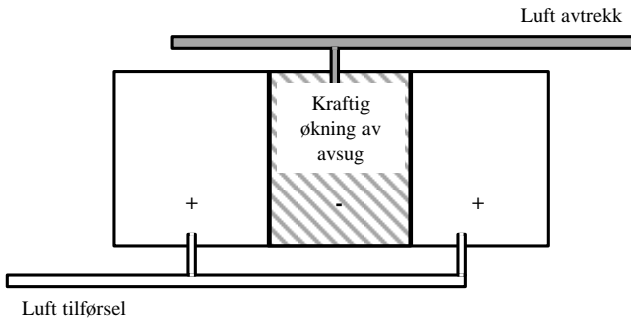
Figur 18.5: Prinsipp for trykksetting av omliggende rom fra brannrommet.



Figur 18.6: Trykksetting av omliggende rom fra brannrommet.

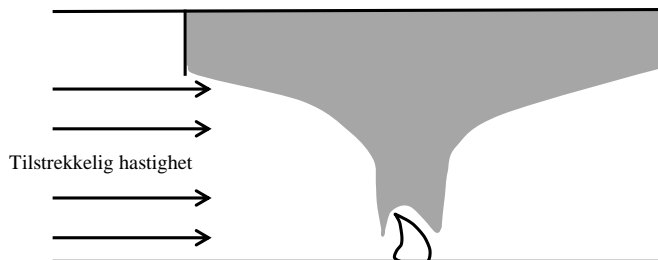


Figur 18.7: Prinsipp for forsert avtrekk i brannrommet.



Figur 18.8: Forsert avtrekk i brannrommet.

skapt bevegelse i luften slik at denne beveger seg mot brannen og røyken. Luften som beveger seg må ha en tilstrekkelig hastighet for å forhindre at røyk spres imot luftens strømningsretning, se figur 18.9. D.v.s. at luften må ha en kritisk hastighet som forhindrer røykspredning. Dersom luften får en mindre hastighet enn den kritiske¹ eller at røykproduksjonen blir større enn forventet, vil det oppstå røykspredning til tross for de motgående luftstrømmingene.



Figur 18.9: Prinsipp for motstrøm.

Begrensninger for aktiv røykkontroll

Prinsippene for aktiv røykkontroll er i teorien lett å gjennomføre. Vanskene begynner først ved bruken av slike prinsipp. Aktiv røykkontroll krever meget avanserte ventilasjonssystemer. I tillegg er det behov for deteksjonssystemer som er i stand til å gi ventilasjonssystemene riktig informasjon om hvilke rom det brenner i og hvor røyk har spredd seg. Videre må ventilasjonssystemene dimensjoneres slik at de kan ivareta sin funksjon ved en brann. For å kunne dimensjonere ventilasjonssystemet, må det bli bestemt en dimensjonerende brann. Denne dimensjonerende brannen vil produsere de trykkforskjellene og den røyken som ventilasjonssystemet må kunne kontrollere.

I tillegg til selve brannen, må planleggingen av ventilasjonssystemene også ivareta de personene som skal rømme bygget. Trykkdifferansene i byggene må ikke bli større enn at personene i bygget kan åpne dørene til f. eks. trapperom o.l. I byggeforskriften av 2017 (TEK17), er det gitt krav om at dører skal kunne åpnes med en kraft av 30 N. Dette må tas hensyn til når ventilasjonssystemet prosjekteres.

18.4.2 Passiv røykkontroll

Passive røykkontrollsystemer benytter de termiske drivkreftene brannen skaper for å transportere røyk. Eventuelt benyttes byggets konstruksjoner som barrierer for å hindre røyk-

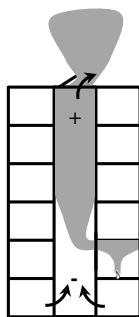
¹Den kritiske luft hastigheten er den minste hastigheten som forhindrer spredning av røyk. Blir hastighetene mindre, vil røyken spre seg til andre rom.

spredning.

Termisk røykventilasjon

Ventilasjonssystem som tar i bruk røykens termiske oppdrift ved ventilering av røyk, blir omtalt som termisk røykventilasjonssystem. Som beskrevet tidligere i dette kapitlet, vil en av drivkreftene for varm røyk være termisk oppdrift som følge av tetthetsforskjellene mellom varm røyk og kald omkringliggende luft [59, 61, 68].

Prinsippet for denne type røykventilasjon ligger i det overtrykket varm luft og røyk skaper i den øvre delen av et bygg. Trykkdifferansen mellom luften og røyken inne i bygget og luften utenfor bygget, vil virke som drivkrefter på røyken. Drivkreftene vil presse røyken ut av den øvre delen av bygget. I den nedre delen av bygget vil trykkdifferansen medføre at luft utenfor bygget beveger seg inn i bygget. Prinsippet er vist i figur 18.10.



Figur 18.10: Prinsipp for termisk røykventilasjon og trykkforskjell.

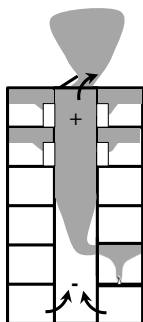
Selve ventileringen av røyken skjer gjennom åpninger i byggets tak eller vegger. Disse åpningene omtales som røykluker og åpnes idet en brann detekteres. Røyklukenes areal blir bestemt som en funksjon av brannens dimensjonerende størrelse og ønske om fri høyde mellom gulv og røyklaget. Den frie høyden er spesielt viktig i rømningsveiene.

Vanskene ved termisk røykventilasjon ligger i den dimensjonerende brannen, lufttilførsel til brannen, uforutsett røykspredning og ønsket rømningstid. Valget av en dimensjonerende brann er vanskelig, og går igjen ved alle typer røykventilasjonssystemer. Det er vanlig å se på brannens utvikling og røykproduksjon. Brannens varmeproduksjonsrate (\dot{q}) kan relateres til røykproduksjonsraten (\dot{m}). Røyklukearealet til en bygning må dimensjoneres for å kunne ventilere ut røyken fra den dimensjonerende brannen. En alternativ måte å se på den dimensjonerende brannen er å vurdere det arealet som brenner. Dette er fremgangsmåten som brukes i HO-3/2000 Røykventilasjon. I denne meldingen er sammenhengen mellom arealet som brenner og røyklukearealet beregnet. Dermed kan den dimensjonerende brannen relateres til røyklukearealet direkte.

Ved bruk av røykventilasjonssystemer, vil det bli transportert frisk luft inn mot brannen. Dette er ett av de viktigste ankepunktene mot bruken av røykventilasjon, fordi den

friske luften vil føre med seg oksygen som brannen kan bruke i forbrenningen. Tilførselen av luft vil medføre at brannen ikke reduseres p.g.a. oksygenmangel, men her er det viktig å huske på hvorfor røykkontrollsystemer er tatt i bruk. Røykventilasjon er tatt i bruk for å øke personsikkerheten i et bygg [68]. Når røyken ventileres vekk fra brannområdet på en kontrollert måte, vil sikkerheten ved rømning øke. Sikkerheten økes ved at rømningsveiene holdes fri for røyk. Videre vil røykventilasjon forsinke oppbyggingen av et røyklag i brannrommet og dermed forlenge tiden til overtenning. Luften som transporteres mot brannområdet virker som et termisk drevet motstrømssystem som hindrer røyken i å bevege seg innover i rømningsveier og andre deler av bygget. Dermed blir det en avveining i hvert enkelt tilfelle om røyken skal ventileres ut med den ulempen at brannen tilføres oksygen eller om personsikkerheten skal ivaretas ved at brannen og røyken kontrolleres på andre måter.

I de tilfeller hvor termisk røykventilasjonssystem brukes i bygg med flere etasjer, kan det forekomme uforutsett røykspredning. Denne uheldige røykspredningen kan forekomme i en del bygg med egne trapperom eller med overbygde glassgårder [68]. Røykspredningen oppstår p.g.a. trykkforskjellene i bygget. I de etasjene som ligger over nøytralplanet, vil det være et positivt overtrykk fra trapperommet eller glassgård og til rommene i de respektive etasjene. Trykket vil presse røyk ut fra trapperom eller glassgård og inn i rom i de øverste etasjene i bygget. I tillegg til overtrykket i de øverste etasjene, vil undertrykket i de nedre delene av trapperom eller glassgård trekke røyken ut fra den etasjen hvor det brenner [68]. Dermed vil et røykventilasjonssystem i et fleretasjers bygg som benytter termisk oppdrift, kunne forårsake en uheldig røykspredning fra den nedre delen av bygget til den øvre. Dette er illustrert i figur 18.11.



Figur 18.11: Uheldig røykspredning.

Løsningene til den uforutsette røykspredningen varierer litt avhengig av bruken av bygget. Det viktigste tiltaket for å hindre denne type røykspredning, er kun å bruke termiske røykventilasjonssystemer i bygg med en etasje. Dermed hindres spredning i andre etasjer p.g.a. trykkforskjeller. Videre er det klart at det ikke må brukes termisk røykventilasjon i trapperom [68]. Trapperom må i sin helhet ha overtrykk i forhold til

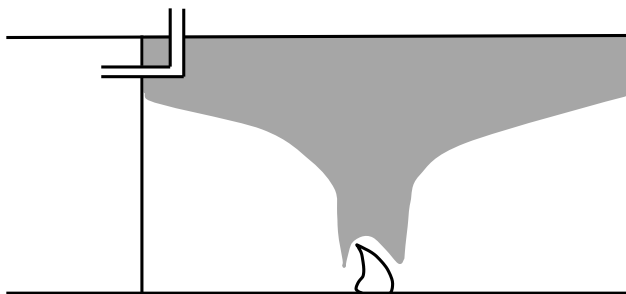
alle etasjene i bygget. Dette fordrer mekanisk trykksetting av trapperommet.

Tette barrierer

Bruken av tette barrierer som vegger, tak og gulv har vært den tradisjonelle måten for å hindre spredning av røyk [61, 68]. I figur 18.12 blir det illustrert hvordan tette vegger blir benyttet til å hindre spredning av røyk fra ett rom til et annet. I stor grad har vegger, tak og gulv en rimelig god funksjon som røykskillende konstruksjoner, men det vil allikevel alltid være noe røyk som beveger seg gjennom konstruksjonen.

Det viktigste ankepunktet i forbindelse med bruken av tette barrierer, er vanskene med å holde barrierene intakt. Både i nye bygg og ved ombygginger av eldre bygg, blir det svært ofte laget hull i barrierene for å strekke rør og ledninger. Det viser seg svært ofte at hull ikke blir tettet skikkelig i forbindelse med gjennomføringer i vegger. Barrierer som er perforert, vil ikke ha mulighet til å opprettholde sin funksjon som røykskillende konstruksjoner.

I forbindelse med røykkontroll bør det arbeides for å ha tette barrierer i bygget, men det er viktig at røykkontrollen ikke kun baseres på disse.

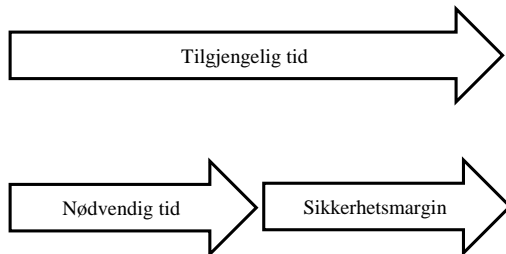


Figur 18.12: Tette barrierer i et rom.

Kapittel 19

Passivt brannvern

For å kunne beskytte bygningsdeler mot brannpåvirkning, er det viktig å sette krav til hvor lenge en bygningsdel skal kunne stå imot en brann. Tiden er viktig fordi den indikerer hvor mye tid som er tilgjengelig for både rømning og brannslukking i bygget. Tilgjengelig tid vil variere avhengig av hvilke krav som blir satt til bygget; er det tilstrekkelig tid til å rømme, eller er det brannvesenets behov for tid til slukking som skal være dimensjonerende for tiden?



Figur 19.1: Tid til slukking eller rømning.

For å kunne avgjøre behovet for brannbeskyttelse av bygningskonstruksjonene, må bruken, rømningstid og brannvesenets innsats vurderes. I lave bygg med lav brannenergi¹ og fokus på personsikkerhet, kan det være tilstrekkelig med en brannmotstand på 15 til 30 minutter. Derimot vil kravet til brannmotstand øke dersom brannvesenet skal arbeide i det aktuelle bygget. I veiledningen til Teknisk forskrift av 2017 (VTEK) benyttes risikoklasse og antall etasjer for å bestemme brannmotstanden som skal avspeile både brannenergi, tid til rømning og tid til at brannvesenet skal kunne utføre effektivt slukningsarbeid.

¹Brannenergi beskriver hvor mye brennbar materiale det er i et rom.

19.1 Begrep

19.1.1 Brannmotstand

Brannmotstand er et uttrykk for hvor lenge en konstruksjon kan motstå påvirkninger fra en brann og fremdeles opprettholde sine lastbærende og brannskillende funksjoner [62]. Tiden som brannmotstanden oppgis i minutter.

Byggeforskriften av 1997 innførte nye begreper for bygningskonstruksjoners egenskaper ved brann. Begrepene er videreført i byggeforskriften av 2017 (TEK17). Begrepene bygger på et harmoniseringsarbeid utført i Europa. Det er fire begreper som beskriver konstruksjoners brannmotstand:

- R - Lastbærende funksjon: Beskrevet som evnen til å motstå brannpåkjenning på én eller flere sider i en gitt tid, uten at bygningsdelen mister nødvendig bæreevne og stabilitet, når den samtidig er påført gitt mekanisk last [86].
- E - Integritet: Beskrevet som bygningsdelens evne til å motstå brannpåkjenning på en av sidene, uten at brannen smitter igjennom, som følge av flammer eller varme gasser [86].
- I - Isolasjon: Beskrevet som evnen til å motstå brannpåkjenning på en av sidene, uten at brannen sprer seg gjennom bygningsdelen som en følge av betydelig varmeledning fra eksponert side til ueksponert side [86].
- Tall - Brannmotstanden oppgis som tiden en konstruksjon skal kunne motstå en brannpåkjenning.

Et eksempel kan være en søyle med krav R60. Dette tilsier at søylen skal kunne motstå en brann i 60 minutter og fremdeles bære den tiltenkte lasten.

19.1.2 Gamle betegnelser

Endringene av begrepene innen brann ble innført i byggeforskriften av 1997. Begrepene som har vært brukt før 1997, bør være kjent for leseren. Betegnelsene er hentet fra Byggeforskriften av 1987², men med små variasjoner i forklaringene.

- A - Henspeiler på bygningsdel som består av ubrennbare materialer.
- B - Henspeiler på bygningsdeler som kan bestå av brennbare materialer, så fremt kravene til branntekniske funksjoner oppfylles.
- F - Henspeiler på konstruksjoner som er flammestoppende og røykbegrensende.
- Tall - Henspeiler på den tiden, angitt i minutter, som en konstruksjon er godkjent for i henhold til normert brannprøving.

²Det er også en rekke begreper fra forskriftene før 1987. Disse er ikke beskrevet her men kan søkes opp på nettsiden til Kollegiet for brannfaglig terminologi (www.kbt.no).

En A120-konstruksjon skal i henhold til begrepsapparatet være en konstruksjon som består av ubrennbare materialer og som ved normert brannprøving har beholdt sine branntekniske egenskaper i minimum 120 minutter.

19.2 Faktorer som påvirker brannmotstanden

Brannmotstanden³ til konstruksjonen vil kunne påvirkes av en rekke faktorer som er relatert til materialeegenskaper. Videre vil også konstruksjonens utforming virke inn på evnen til å motstå varmegjennomgang.

19.2.1 Beskyttelsesmekanismer

Materialtykkelse

Tykkelsen på isolasjonsmaterialet som beskytter en konstruksjon er viktig for brannmotstanden. Brannmotstanden øker proporsjonalt med tykkelsen [62]. Dette korrelerer godt med Fouriers lov.

Termisk moment ($k\rho c_p$)

Begrepet termisk moment defineres som produktet av varmeledningstallet (k), tetthet (ρ) og spesifikk varmekapasitet (c_p), dvs. $k\rho c_p$. Det termiske momentet beskriver hvordan et materiale varmes opp, og hvordan energien sprer seg gjennom en konstruksjon. I tabell 19.1 er det gitt noen eksempler på materialer og deres termiske moment.

Varmeledningstallet (k) beskriver hvor mye energi som transporteres fra ett punkt til et annet i en konstruksjon. Høye verdier av k tilsier en stor energitransport og visa versa. Videre viser det seg at det er et visst forhold mellom varmeledningsevne og materialets tetthet (ρ). Materialer med lav tetthet har også ofte et lavt varmeledningstall og liten evne til å lede varme.

Den siste delen av det termiske momentet er spesifikk varmekapasitet (c_p). Varmekapasiteten beskriver hvor mye energi som må tilføres et materiale for å heve temperaturen med en grad celsius. Lave verdier tilsier at det må tilføres lite energi for å øke temperaturen i materialet.

Det termiske momentet til materialet beskriver to viktige egenskaper til materialer i forbindelse med brann. Materialer med med lav $k\rho c_p$ leder varme dårlig og forhindrer varmen i å trenge inn i en konstruksjon. Dette er en god egenskap i forbindelse med passiv brannbeskyttelse av en konstruksjon. Ulempen med at varmen ikke transporteres vekk via konstruksjonen, er at overflatene til veggene i brannrommet varmes opp hurtigere. Denne oppvarmingen gir seg utslag i at brennbare materialer antennes lettere og at overtenning opptrer hurtigere i brannrommet [26].

³I denne delen av kapitlet blir brannmotstanden kun relatert til varmegjennomgangen i konstruksjonen. Svekkelser p.g.a. sprekker o.l. blir ikke omtalt.

Tabell 19.1: Materialverdier for forskjellige materialer [13].

Material	Varmelednings- tall (k) W/m·K	Spesifikk varmekapasitet (c_p) J/kg·K	Tetthet (ρ) kg/m ³	Termisk moment ($k\rho C_p$) W ² s/m ⁴ K ²
Kobber	387	380	8949	$1,3 \cdot 10^9$
Stål	45,8	460	7850	$1,6 \cdot 10^8$
Murstein	0,69	840	1600	$9,3 \cdot 10^5$
Betong	0,8 - 1,4	880	1900 - 2300	$2 \cdot 10^6$
Glassplate	0,76	840	2700	$1,7 \cdot 10^6$
Gips	0,48	840	1140	$5,8 \cdot 10^5$
PMMA*	0,19	1420	1190	$3,2 \cdot 10^5$
Eik	0,17	2380	800	$3,2 \cdot 10^5$
Furu	0,14	2850	640	$2,5 \cdot 10^5$
Asbest	0,15	1050	577	$9,1 \cdot 10^4$
Polyuretan- skum	0,034	1400	20	$9,5 \cdot 10^2$
Luft	0,026	1040	1,1	-

*PMMA står for Polymetylmethacrylate eller Pleksiglass.

Dehydrering

En rekke isolasjonsmaterialer har både fritt og krystallisert vann i seg. Fordamping av dette vannet krever store mengder energi. Videre må det brukes energi for å løsrive vannet fra gitterkonstruksjonene i materialet. Fordampning av det frie vannet vil skje ved en temperatur rundt 100 °C, se figur 19.2.

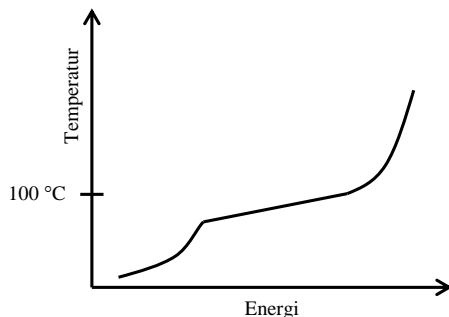
Fordampning av det krystalliserte vannet vil avhenge av oppbyggingen av gitterkonstruksjonen. For gips vil vannet frigis og fordampe fra 150 °C til 200 °C [62]. Tilstedeværelsen av vann i materialer vil øke brannmotstanden betydelig, og er svært viktig i denne forbindelsen.

Refleksjon

En rekke materialer har egenskaper som gjør at store deler av varmestråling blir reflektert. Dette gjør at mindre energi blir tatt opp, og konstruksjonen holder seg kjøligere [62].

19.2.2 Harmathys regler

Harmathy arbeidet en årrekke med passiv brannbeskyttelse. Gjennom dette arbeidet utarbeidet han 10 regler som kan være nyttige i forbindelse med vurdering av forskjellige konstruksjoners brannmotstand [45].



Figur 19.2: Dehydrering av et materiale.

- Nr. 1 Den termiske brannmotstanden for en konstruksjon bestående av flere lag, er større enn summen av brannmotstanden for de enkelte lagene når de er testet separat i brann.

Forklaring: Denne regelen tilsier at dersom en konstruksjon består av flere lag, så vil konstruksjonen ha en brannmotstand som er større enn summen av enkeltmotstandene til de forskjellige materialene. Dette kommer klarere frem ved å se på konstruksjoner som består av flere lag (n) av det samme materiale med brannmotstand t .

$$t_n > n \cdot t$$

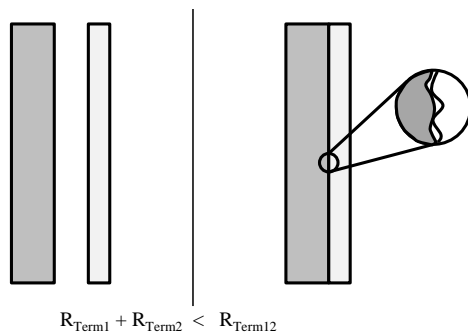
Relatert til varmelære, kan denne regelen forklares med at energi må transporteres mellom to materialer som ikke er i kontakt med hverandre over hele tverrsnittet, se figur 19.3. Denne dårlige forbindelsen oppstår fordi materialene på mikronivå vil ha en ru overflate, og transporten av energi blir dermed redusert.

- Nr. 2 Brannmotstanden til en konstruksjon reduseres ikke når det legges til nye lag.

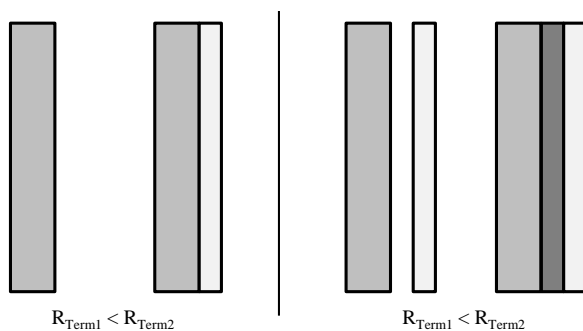
Forklaring: Denne regelen følger som en konsekvens av regel nr. 1. Fra varmelære kan dette forklares med at konstruksjonen får en økt varmekapasitet og at motstanden mot varmeledning økes, se figur 19.4.

- Nr. 3 Brannmotstanden til konstruksjoner som inneholder gjennomgående luftlag eller -lommer, er større enn hos lignende konstruksjoner uten luftlagene.

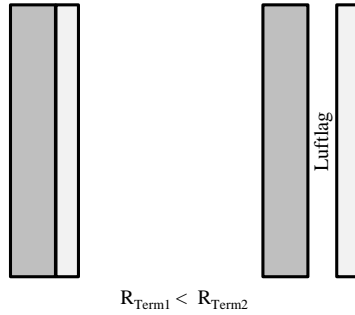
Forklaring: Luftlag eller -lommer vil øke motstanden mot varmegjennomgang. Grunnen er at energien i stor grad må stråles mellom sidene på luftlaget. I denne forbindelsen vil emissiviteten til konstruksjonen påvirke hvor mye stråling som blir strålt ut og tatt i mot. Se figur 19.5.



Figur 19.3: Den samlede brannmotstanden er større enn summen av enkelt brannmotstandene p.g.a. dårlig varmeledning mellom materialene.



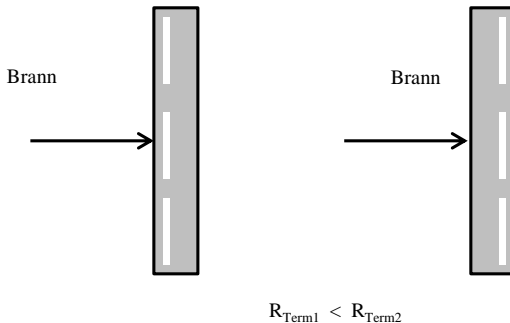
Figur 19.4: Økt varmekapasitet gir bedre brannmotstand.



Figur 19.5: Luftlag øker brannmotstanden.

Nr. 4 Desto større avstand det er mellom luftlommene og den eksponerte siden, desto mer fordelaktig er dette for brannmotstanden.

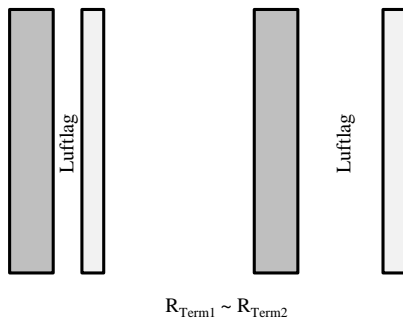
Forklaring: I luftlommer skjer varmetransporten primært via varmestråling. Et luftlag i den varme sonen av konstruksjonen vil ha liten virkning som isolasjonsmateriale fordi mye av energien stråles over. Er luftlaget i den kalde sonen, vil mindre energi stråles over. Her er det viktig å huske at stråling er en funksjon av temperaturen i fjerde potens. Se figur 19.6.



Figur 19.6: Plasseringen av luftlag er viktig for brannmotstanden.

Nr. 5 Brannmotstanden til en konstruksjon øker ikke ved økt bredde på lukkede luftlommer.

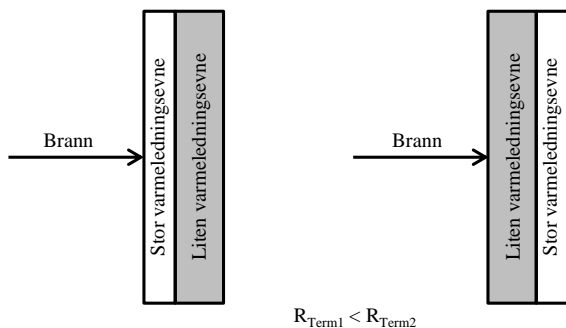
Forklaring: Forsøk har vist at dersom luftlag blir bredere enn 1,25 cm, vil varme-transporten være dominert av temperaturen på sidene av laget. Dette gjenspeiler igjen viktigheten av varmestråling, som i denne forbindelsen vil være mindre avhengig av avstand. Denne regelen forutsetter at luftlaget er tett og at det ikke kommer inn frisk luft som kjøler. Se figur 19.7.



Figur 19.7: Bredden til luftlaget er mindre viktig for brannmotstanden.

Nr. 6 Det er fordelaktig for brannmotstanden å bruke materialelag med lav termisk varmeledningsevne på den siden som er vendt mot den branneksponte siden.

Forklaring: Materialer med lave varmeledningstall vil i større grad enn materialer med høye varmeledningstall, forhindre progresjonen av en varmefront i konstruksjonen. Se figur 19.8.



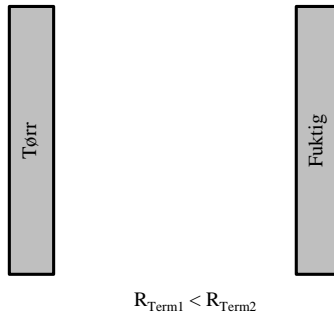
Figur 19.8: Rekkefølgen til materialene er viktig.

Nr. 7 Brannmotstanden til en asymmetrisk konstruksjon er avhengig av retningen på varmestrømmen.

Forklaring: Denne regelen summerer opp reglene om viktigheten av rekkefølge på materialene, luftlag o.l. på konstruksjonens brannmotstand.

Nr. 8 Fuktighet i konstruksjonen øker brannmotstanden.

Forklaring: Fuktighet i konstruksjonen vil øke brannmotstanden til konstruksjonen fordi det må brukes energi til å fordampe vann. Se figur 19.9.



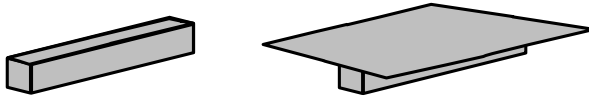
Figur 19.9: Fukt i konstruksjonen øker brannmotstanden.

Nr. 9 Lastbærende elementer som bjelker o.l. har en høyere brannmotstand når de testes som en del av et gulv eller tak, enn når de testes alene.

Forklaring: Gulvet eller taket vil være med på å stive av konstruksjonen, samt overføre last til andre deler av konstruksjonen. Dette gjør at bjelken belastes mindre og dermed bedres brannmotstanden. Se figur 19.10.

Nr. 10 Lastbærende elementer i gulv eller tak kan byttes med et annet lastbærende element, når det nye elementet har minst den samme brannmotstanden som gulvet eller taket.

Forklaring: En bjelke i en konstruksjon kan byttes med en annen bjelke, forutsatt at denne nye bjelken har samme eller bedre brannmotstand enn selve konstruksjonen.



$$R_{\text{Term1}} < R_{\text{Term2}}$$

Figur 19.10: Konstruksjonsutforming påvirker brannmotstanden.

19.3 Beskyttelse av bygningsdeler

Bygningsdeler kan beskyttes på flere måter. Hvordan en spesifikk bygningsdel beskyttes er avhengig av både bygningsmaterialet og design av bygget.

19.3.1 Metoder

Overdimensjonering

Ved å overdimensjonere et element, kan deler av elementet ødelegges eller fjernes uten at dette reduserer funksjonen til elementet [88]. Treverk er en type materiale hvor denne type beskyttelse er brukt.

Isolering

Ved å isolere et element, vil en forsinke varmetransporten inn i elementet [62, 88]. Det tar derfor lengre tid å nå kritisk temperatur. Stål og betong er materialer hvor denne type beskyttelse er mye brukt.

Øke varmekapasiteten

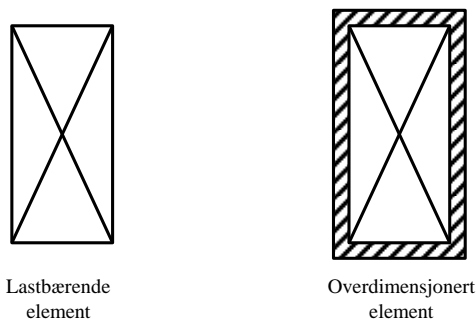
Ved å lede varme vekk fra elementet, kan en forsinke oppvarmingen av elementet og dermed forlenge tiden til kritisk temperatur er oppnådd [62, 88]. Denne metoden kan brukes for stål ved å vannfylte stålkonstruksjoner, men dette er mindre vanlig.

19.3.2 Tre

Tre er et vanlig bygningsmateriale i Norge, med lange tradisjoner. I motsetning til mange andre bygningsmaterialer brenner tre og bidrar til en eventuell brann.

Det at tre brenner eller forkuller er faktisk med på å beskytte treverket ved å forme et isolerende lag av trekull [88]. Ved ca. 300 °C vil treverk forkulle. Laget med forkullet treverk har egenskaper som et isolasjonsmateriale, og forsinker videre varmetransport [62].

Forkullingshastigheten til treverket er mellom 0,4 og 0,8 millimeter pr. minutt, men i beregninger blir det brukt et gjennomsnittstall på ca. 0,67 millimeter pr. minutt [62, 88]. Forkullingshastigheten kan brukes til å overdimensjonere en trekonstruksjon slik at den kan motstå brann i en viss tid, se figur 19.11 for illustrasjon.



Figur 19.11: Overdimensjonering av treverk gir bedre brannmotstand.

19.3.3 Stål

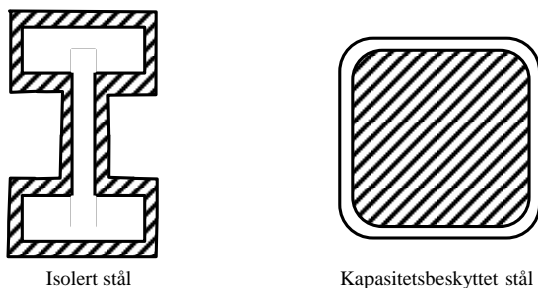
Stål er et godt byggeteknisk materiale som gir slanke og sterke konstruksjoner. I forhold til brann har ubeskyttet stål en svakhet ved at det har mistet 50 % av styrken ved ca. 550 °C [62, 88]. For å beholde styrken i en brannsituasjon, må stålet beskyttes. Metodene for strukturell beskyttelse er diskutert ovenfor. Selve utførelsen kan skje med brannhemmende maling⁴, påsprøytet mineralull eller isolerende plater. Det kan også brukes materialer som leder vekk varme, som vann og betong, se figur 19.12 for illustrasjon.

19.3.4 Betong

Betong er også et godt bygningsmateriale, som på lik linje med stål mister styrke ved oppvarming. Derimot skiller betong seg fra stål ved å lede varme mye dårligere enn stål. Betongkonstruksjoner kan derfor uten store vansker utformes til å ha en brannmotstand på mange timer (2-3 timer og oppover) [88].

Ved bruk av betong er det to forhold som må ivaretas: avskalling og overdekning av armering. Avskalling skjer som følge av fordampning av fritt vann i betongens porer, med følgende trykkoppbygging. Ved tilstrekkelig oppvarming vil vanndampen skape et

⁴Dette er maling som ekspanderer ved oppvarming og danner et tykkere isolasjonsmateriale.



Figur 19.12: Alternative metoder for å beskytte stål.

overtrykk som er tilstrekkelig til å sprengte løs deler av betongen. Denne type avskalling reduserer tverrsnittet på betongen og kan også redusere overdekningen til armeringen. Overdekningen av armeringen i betong er svært viktig fordi armeringen tar strekkreftene i konstruksjonen. Dersom overdekningen ikke er god nok vil armeringen som er laget av stål, varmes opp og miste styrke på lik linje med vanlig stål. Oppstår denne situasjonen, vil konstruksjonen ikke tåle de påsatte strekk-kreftene.

19.4 Seksjonering

Seksjonering blir brukt for å hindre brannspredning i bygg. Størrelsen på seksjonene er avhengig av bruk og brannenergi. Mindre seksjoner kalles brannceller og brukes for å beskytte spesielle områder som rømningsveier, leilighet, hotellrom o.l. hvor det er ønskelig å begrense brannspredningen til et lite område eller gi bedre beskyttelse fra brann i andre seksjoner. Større seksjoner blir kalt brannseksjoner og brukes for å hindre brann i å spre seg i større deler av bygget. Kravet til brannceller er EI60. Men det er ikke krav til at elementene i branncellen skal være selvbærende⁵. Kravet til brannseksjonene er at disse skal ha elementer som kan motstå brann i 90 minutter, samt at elementene skal være selvbærende.

Erfaring viser at branncellebegrensende bygningsdeler og seksjoneringsvegger er svært utsatt for punkteringer og gjennomføringer som følge av arbeid med rør og ledninger. Trekking av rør og ledninger medfører ofte større og mindre hull i elementene. Hullene i elementene gjør det mulig for brann og røyk å spre seg i et bygg. Det er den enkelte montør som har ansvar for at hull som lages tettes når rør o.l. er trukket igjennom. Erfaringene fra byggevirksomhet viser at få tar ansvar for å tette disse hullene. Det er derfor viktig at en person eller et firma får i oppdrag å tilse at hullene er tettet. Tetningene som brukes for å tette hull i seksjoneringsselement, må være godkjent for den

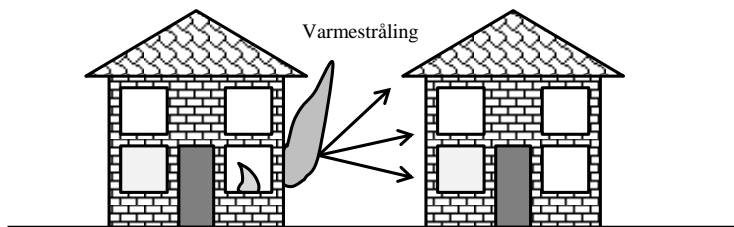
⁵Selvbærende betyr at konstruksjonen kan stå av seg selv, uten støtte fra andre konstruksjoner.

tiltenkte bruk. Dokumentasjonen som følger en godkjent tetting må inneholde: Dokument fra testorganisasjon, beskrivelse av tettingen og monteringsbeskrivelse.

Brannspredning mellom bygninger kan hindres ved å ha tilstrekkelig avstand mellom bygningene. Dersom det ikke er mulig å tilfredstille krav til avstand, kan det bygges en brannvegg⁶ som kan hindre brannspredningen.

19.5 Hindre brannsmitte mellom bygg

Å hindre brannspredning mellom bygg, også omtalt som brannsmitte, er svært viktig innen brannvern. Brannsmitte skjer primært via varmestråling eller gnister. Varmestråling vil komme fra flammer som har spredt seg ut gjennom vinduer eller vegger. Er flammene tilstrekkelig store og avstanden mellom byggene liten, kan varmestrålingen være kraftig nok til å forårsake antennelse på fasaden til nabohuset eller i objekter i bakenforliggende rom, se figur 19.13. Gnister i form av glødende treverk, kan bli fraktet av vind eller de konvektive luftstrømningene som brannen skaper. Brannsmitte oppstår idet gnister treffer og antenner tak eller fasade til nabohuset [88].



Figur 19.13: Antennelse av nabohus p.g.a. varmestråling fra flamme.

For å beskytte andre bygg mot varmestråling, er det viktig å ha tilstrekkelig avstand mellom bygg. Innen norsk lovgivning er en avstand på 8 m akseptert mellom bygg, se Teknisk forskrift av 2017 (TEK17). De 8 m bygger på erfaring trukket over mange år. Erfaringene kommer fra bygg med små eller middels store vinduer. Dersom vindusarealet øker, kan det være behov for større avstander. Avstanden kan beregnes ved behov. Dersom det ikke kan opprettes tilstrekkelig avstand, må det brukes brannvegger for å hindre brannsmitte.

⁶Det er nå gjort et skille mellom brannvegg og seksjoneringsvegg. Brannvegger skal skille forskjellige eiendommer og ha en brannmotstand på 120 minutter. Seksjoneringsvegger skal brukes for å dele opp bebyggelsen på samme eiendom. Kravet til denne type vegg går fra 90 minutter og oppover avhengig av bruken av eiendommen.

For å kunne forhindre brannsmitte via gnister, er materialvalg viktig. Teoretisk vil det være best å bruke materialer som ikke gnister, men dette er vanskelig å gjennomføre i praksis. For å beskytte et bygg vil det være best å beskytte mot eventuelle gnister. Beskyttelsen kan f.eks. være ubrennbare takflater som takstein. Bruken av riktige materialer er regulert av byggeforskriftene og det henvises til forskriftene. Hvilke metoder som skal brukes avhenger av bygg og avstand.

19.6 Standardbrann

Det har vist seg å være svært vanskelig og tidkrevende å forutsi hvordan en brann vil oppføre seg [63]. For å kunne beskrive hvordan en brann opptrer, må det foreligge meget god informasjon om brenselet, hvordan ventilasjonen vil bli, plassering av objektene som brenner o.l. Disse opplysningene må være tilstede før brannen oppstår.

Standardbranner er innført p.g.a. usikkerhetene rundt de forskjellige parameterne som inngår i brannscenarier. Disse standardbrannene er uttrykt som tid-temperaturkurver. Det er viktig å være oppmerksom på at standardbranner ikke representerer virkelige branner, men skal kun brukes i forbindelse med prøving av bygningsmaterialer og bygningskonstruksjoner. Standardbrannene er likevel viktige fordi disse skal være mer konservative⁷ i forhold til forventede bygningsbranner [63].

Standard tid-temperaturkurven som brukes i Norge er beskrevet i ISO-834 og er gitt i ligning 19.1, se også figur 19.14.

$$T - T_0 = 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \quad (19.1)$$

hvor:

t er tiden i minutter

T er temperaturen i rommet ved tiden t (°C)

T₀ er start-temperaturen i rommet ved tiden lik null (°C)

Konstruksjoner og materialer som skal motstå hydrokarbon-branner (HC-branner), blir testet ved å bruke en standardbrann som har høyere temperatur i den første delen av testen. Denne standardbrannen er utarbeidet av Oljedirektoratet. Hydrokarbonbrannens temperatur kan utledes fra ligning 19.2.

$$T = 1100[1 - 0,325 e^{(-0,1667t)} - 0,204 e^{(-1,417t)}] - 0,471 e^{(-15,833t)} \quad (19.2)$$

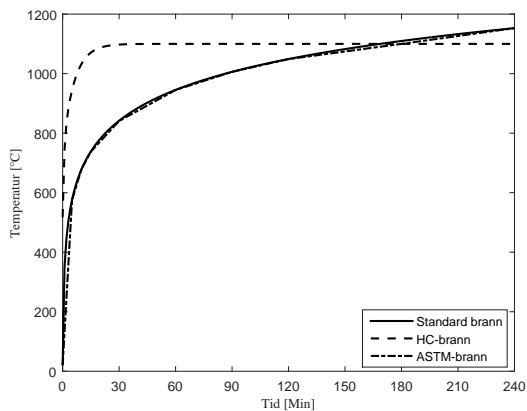
hvor:

t er tiden i minutter

T er temperaturen i rommet ved tiden t (°C)

⁷Med konservativt menes det i dette tilfellet at en standardbrann gir en større belastning enn en ordinær brann.

Det må presiseres at forskjellige land bruker forskjellige standardbranner [63]. Dette gir seg utslag i at produkter som brukes i forskjellige land må godkjennes i de respektive landene. Det arbeides med å harmonisere forskjellige standarder for brannene innen EU/EØS og mellom USA og Europa. Dette arbeidet er ikke sluttført på nåværende tidspunkt. Figur 19.14 viser tre forskjellige standardbranner som alle blir brukt for å teste bygningskonstruksjoner. ASTM-standarden blir brukt i USA [63].



Figur 19.14: Standard tid-temperatur kurver.

Eksempel 19.1

Bruk ISO 834 til å finne temperaturen i et rom ved følgende tidspunkt:

- 60 minutter
- 120 minutter
- 240 minutter

Temperaturen i rommet når brannen starter er 20 °C.

Løsning:

For $t = 60$ minutter

$$\begin{aligned} T - T_0 &= 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \\ &= 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot 60 + 1) \\ T &= 925 \text{ °C} + 20 \text{ °C} \\ &= 945 \text{ °C} \end{aligned}$$

Fremgangsmåten for de andre tidene er lik den som er vist ovenfor.

t (min)	T (°C)
60	945
120	1049
240	1153

Eksempel 19.2

Bruk HC-standardbrannen til å finne branntemperaturen i et rom for følgende tidspunkt:

- 15 minutter
- 30 minutter
- 60 minutter

Løsning:

For $t = 15$ min

$$\begin{aligned}
 T &= 1100[1 - 0,325 e^{(-0,1667t)} - 0,204 e^{(-1,417t)}] \\
 &\quad - 0,471 e^{(-15,833t)} \\
 &= 1100[1 - 0,325 e^{(-0,1667 \cdot 15)} - 0,204 e^{(-1,417 \cdot 15)}] \\
 &\quad - 0,471 e^{(-15,833 \cdot 15)} \\
 T &= 1071 \text{ °C}
 \end{aligned}$$

Fremgangsmåten for de andre tidene er lik den som er vist ovenfor.

t (min)	T (°C)
15	1071
30	1098
60	1100

Del VI
Tillegg

Tillegg A

Tabeller

A.1 SI-systemet

SI-enheter			
Størrelse	Enhet	Symbol	
Lengde	meter	m	
Masse	kilogram	kg	
Tid	sekund	s	
Termodynamisk			
Temperatur	Kelvin	K	
Mengde av stoff	mole	mol	

SI utviklede enheter			
Størrelse	Enhet	Symbol	
Areal	kvadrat meter	m^2	
Volum	kubikk meter	m^3	
Massetetthet eller	kilogram pr.		
Densitet	kubikk meter	kg/m^3	
Fart, Hastighet	meter pr sekund	m/s	
Kraft	newton	N	$kg \cdot m/s^2$
Trykk	pascal	Pa	N/m^2
Arbeid, Energi,			
Størrelse for varme	Joule	J	$N \cdot m$
Effekt	Watt	W	J/s
Spesifikk varmekapasitet	joule pr kilogram Kelvin	$J/(kg \cdot K)$	
Termisk varmeledning	watt pr meter Kelvin	$W/(m \cdot K)$	

A.2 SI-prefikser

Faktor	Prefiks	Symbol	Faktor	Prefiks	Symbol
10^{18}	exa	E	10^{-1}	desi	d
10^{15}	peta	P	10^{-2}	centi	c
10^{12}	tera	T	10^{-3}	milli	m
10^9	giga	G	10^{-6}	mikro	μ
10^6	mega	M	10^{-9}	nano	n
10^3	kilo	k	10^{-12}	pico	p
10^2	hekto	h	10^{-15}	femto	f
10^1	deka	da	10^{-18}	atto	a

A.3 Greske bokstaver

Greske bokstaver								
Alfa	A	α	Iota	I	ι	Rho	P	ρ
Beta	B	β	Kappa	K	κ	Sigma	Σ	σ
Gamma	Γ	γ	Lambda	Λ	λ	Tau	T	τ
Delta	Δ	δ	My	M	μ	Ypsilon	Υ	υ
Epsilon	E	ϵ	Ny	N	ν	Phi	Φ	ϕ, φ
Zeta	Z	ζ	Ksi	Ξ	ξ	Khi	X	χ
Eta	H	η	Omikron	O	\omicron	Psi	Ψ	ψ
Theta	Θ	θ	Pi	Π	π	Omega	Ω	ω

A.4 Omregningsfaktorer

Fra SI-enheter til andre enheter	Fra andre enheter til SI-enheter
Lengde	
1 cm = 0,3937 in	1 in = $2,54 \cdot 10^{-2}$ m
1 m = 3,281 ft	1 ft = 0,3048 m
Masse	
1 kg = 2,2046 lbm	1 ounce = $2,835 \cdot 10^{-2}$ kg
	1 lbm = 0,4536 kg
Trykk	
1 Pa = 1 N/m ²	1 bar = $1 \cdot 10^5$ Pa
1 Pa = $1 \cdot 10^{-5}$ bar	1 atm = $1,013 \cdot 10^5$ Pa
	1 N/m ² = 1 Pa
Energi, Arbeid og varme	
1 J = $0,9478 \cdot 10^{-3}$ Btu	1 Btu = 1055 J
1 J = 0,2388 cal	1 cal = 4,186 J
Effekt	
1 W = $0,9478 \cdot 10^{-3}$ Btu/s	1 hk = 745,7 W
	= 3,412 Btu/hr
1 W = 0,2388 cal	1 Btu/hr = 0,2930 W

Tillegg B

Varmeledning i semi-uendelige materialer

B.1 Utledning

Den partielle differensial-ligningen som beskriver en-dimensjonal varmeledning i semi-uendelige materialer kan løses ved hjelp av Laplace transformasjon. Utgangspunktet er ligningen for varmetransport i en dimensjon sammen med grensebetingelser.

Det vil bli utledet en generell ligning for denne type varmetransport. For å ha et utgangspunkt for utledningen vil det bli tatt utgangspunkt i en semi-uendig lang, godt isolert ledning som har en uniform temperatur T_i . Ved tiden null blir ledningssenden i $x = 0$ varmet opp til T_∞ . Etterhvert som tiden går, vil temperaturen utover i ledningen øke.

For å forenkle utledningen, vil T_i bli antatt som et nullpunkt i selve utledningene. Det innføres derfor en ny variabel som beskriver forholdet mellom temperatur og starttemperatur:

$$\theta = T - T_i \tag{B.1}$$

$$\theta_\infty = T_\infty - T_i \tag{B.2}$$

Den en-dimensjonale varmeledning ligningen er gitt i B.3

$$\frac{\delta^2 \theta}{\delta x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\delta \theta}{\delta t} = 0 \tag{B.3}$$

Med følgende grensebetingelser:

$$\theta(x, 0) = 0 \tag{B.4}$$

$$\theta(0, t) = \theta_\infty \tag{B.5}$$

Varmeledning ligningen kan utvides og omformes ved en Laplace transformasjon.

$$\int_0^\infty e^{-st} \frac{\delta^2 \theta}{\delta x^2} dt - \frac{1}{\alpha} \int_0^\infty e^{-st} \frac{\delta \theta}{\delta t} dt = 0 \tag{B.6}$$

$$\frac{\delta^2}{\delta x^2} \mathcal{L}\{\theta\} - \frac{1}{\alpha} [s \mathcal{L}\{\theta\} - \theta(x, 0)] = 0 \tag{B.7}$$

Av grensebetingelsene følger det at $\theta(x, 0)$ er lik null og dette leddet faller bort. Videre gjøres en forenkling av ligningen B.7.

$$p^2 = \frac{s}{\alpha} \quad (\text{B.8})$$

$$\frac{\delta^2}{\delta x^2} \mathcal{L}\{\theta\} - p^2 \mathcal{L}\{\theta\} = 0 \quad (\text{B.9})$$

Ved hjelp av Laplace-transformasjonen er den partielle differensial-ligningen i B.3 gjort om til en ordinær differensial-ligning i B.9.

Den ordinære differensialligningen løses som vanlig.

$$\frac{\delta^2}{\delta x^2} \mathcal{L}\{\theta\} - p^2 \mathcal{L}\{\theta\} = 0 \quad (\text{B.10})$$

$$\lambda^2 - p^2 = 0 \quad (\text{B.11})$$

$$\lambda = \pm p \quad (\text{B.12})$$

$$\mathcal{L}\{\theta\} = A e^{px} + B e^{-px} \quad (\text{B.13})$$

Leddene $A e^{px}$ vil øke med økende x . A må derfor være lik null p.g.a. grensebetingelsen $\lim_{x \rightarrow \infty} \theta \rightarrow 0$. B i leddet $B e^{-px}$, må være lik den laplacetransformerte veggtemperaturen $\theta(0, t)$ som følge av x i uttrykket. Laplace-transformasjonen av $\theta(0, t)$ blir da:

$$\mathcal{L}\{\theta(0, t)\} = \frac{\theta_\infty}{s} \quad (\text{B.14})$$

Ligningen forenkles til:

$$\mathcal{L}\{\theta\} = \frac{\theta_\infty}{s} e^{-px} \quad (\text{B.15})$$

Den inverse transformasjonen gir da:

$$\theta = \theta_\infty \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right] \quad (\text{B.16})$$

θ er kun et uttrykk for en temperaturforskjell eller ΔT . For å finne temperaturen i et punkt ved en bestemt tid, må θ omgjøres til et uttrykk for temperatur.

$$\theta = T - T_i \quad (\text{B.17})$$

$$\theta_\infty = T_\infty - T_i \quad (\text{B.18})$$

Disse to uttrykkene brukes videre i ligningen¹ for varmeledning B.16.

$$\theta = \theta_{\infty} \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right] \right) \quad (\text{B.19})$$

$$1 - \frac{\theta}{\theta_{\infty}} = \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right] \quad (\text{B.20})$$

$$\frac{\theta_{\infty} - \theta}{\theta_{\infty}} = \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right] \quad (\text{B.21})$$

$$\frac{T_{\infty} - T_i - T + T_i}{T_{\infty} - T_i} = \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right] \quad (\text{B.22})$$

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right] \quad (\text{B.23})$$

Ligningen B.23 er en generell ligning for både oppvarming og avkjøling, og blir brukt i kapitlet om transient varmeledning.

¹For å avklare misforståelser nevnes: $\operatorname{erfc}[\gamma] = 1 - \operatorname{erf}[\gamma]$

B.2 Error-funksjonen

$\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$	$\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$	$\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$	$\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$	$\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$	$\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$	$\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$	$\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$
0,00	0,00000	0,60	0,60386	1,20	0,91031	1,80	0,98909
0,02	0,02256	0,62	0,61941	1,22	0,91553	1,82	0,98994
0,04	0,04511	0,64	0,63459	1,24	0,92050	1,84	0,99074
0,06	0,06762	0,66	0,64938	1,26	0,92524	1,86	0,99147
0,08	0,09008	0,68	0,66278	1,28	0,92973	1,88	0,99216
0,10	0,11246	0,70	0,67780	1,30	0,93401	1,90	0,99279
0,12	0,13476	0,72	0,69143	1,32	0,93806	1,92	0,99338
0,14	0,15695	0,74	0,70468	1,34	0,94191	1,94	0,99392
0,16	0,17901	0,76	0,71754	1,36	0,94556	1,96	0,99443
0,18	0,20094	0,78	0,73001	1,38	0,94902	1,98	0,99489
0,20	0,22270	0,80	0,74210	1,40	0,95228	2,00	0,995322
0,22	0,24430	0,82	0,75381	1,42	0,95538	2,10	0,997020
0,24	0,26570	0,84	0,76514	1,44	0,95830	2,20	0,998137
0,26	0,28690	0,86	0,77610	1,46	0,96105	2,30	0,998857
0,28	0,30788	0,88	0,78669	1,48	0,96365	2,40	0,999311
0,30	0,32863	0,90	0,79691	1,50	0,96610	2,50	0,999593
0,32	0,34913	0,92	0,80677	1,52	0,96841	2,60	0,999764
0,34	0,36936	0,94	0,81627	1,54	0,97059	2,70	0,999866
0,36	0,38933	0,96	0,82542	1,56	0,97263	2,80	0,999925
0,38	0,40901	0,98	0,83423	1,58	0,97455	2,90	0,999959
0,40	0,42839	1,00	0,84270	1,60	0,97636	3,00	0,999978
0,42	0,44749	1,02	0,85084	1,62	0,97804	3,20	0,999994
0,44	0,46622	1,04	0,85865	1,64	0,97962	3,40	0,999998
0,46	0,48466	1,06	0,86614	1,66	0,98110	3,60	1,000000
0,48	0,50275	1,08	0,87333	1,68	0,98249		
0,50	0,52050	1,10	0,88020	1,70	0,98379		
0,52	0,53790	1,12	0,88079	1,72	0,98500		
0,54	0,55494	1,14	0,89308	1,74	0,98613		
0,56	0,57162	1,16	0,89910	1,76	0,98719		
0,58	0,58792	1,18	0,90484	1,78	0,98817		

Tillegg C

Materialverdier

Tabell C.1: Formasjons- og forbrenningsvarme

Stoff	Kjemisk formel	Formasjonsvarme ΔH_f (kJ/mol)	Brutto forbrenningsvarme $-\Delta H_{C,Brutto}$ (kJ/mol)	Netto forbrenningsvarme				
				$-\Delta H_C$ (kJ/mol)	$-\Delta H_C$ (kJ/g)	$-\Delta H_C$ (kJ/g(O ₂))	$-\Delta H_C$ (kJ/Luft))	
Metan	CH ₄	-75	890	800	50	12,54	2,91	
Etan	C ₂ H ₆	-85	1560	1423	47,5	11,21	2,96	
Propan	C ₃ H ₈	-104	2220	2044	46,5	12,8	2,98	
Butan	C ₄ H ₁₀	-126	2877	2657	45,8	12,8	2,98	
Pentan	C ₅ H ₁₂	-173	3509	3245	45,1	12,7	2,96	
Hexan	C ₆ H ₁₄	-199	4163	3855	44,8	12,7	2,96	
Heptan	C ₇ H ₁₆	-225	4817	4464	44,7	12,7	2,96	
Octan	C ₈ H ₁₈	-247	5470	5077	44,5	12,7	2,96	
Nonan	C ₉ H ₂₀	-272	6125	5688	44,4	12,7	2,96	
Dekan	C ₁₀ H ₂₂	-297	6778	6298	44,4	12,7	2,96	
Eten	C ₂ H ₄	52	1411	1323	47,2	13,8	3,21	
Propen	C ₃ H ₆	20	2058	1926	45,9	13,4	3,12	
Etyn	C ₂ H ₂	228	1301	1257	48,3	15,7	3,66	
Propyn	C ₃ H ₄	185	1937	1849	46,2	14,4	3,37	
Benzen	C ₆ H ₆	50	3268	3137	40,2	13,1	3,05	
Toluen	C ₇ H ₈	13	3910	3735	40,6	13	3,02	
Metanol (l)	CH ₃ OH	-239	726	638	19,9	13,3	3,09	
Etanol (l)	C ₂ H ₅ OH	-278	1367	1234	26,8			
1-Propanol (l)	C ₃ H ₇ OH	-306	2021	1842		12,9	3	
1-Butanol (l)	C ₄ H ₉ OH	-325	2676	2458				

Brutto forbrenningsvarme fremkommer når produktene når 25 °C, dvs. $\Delta H_{f, V_{ann}(l)} = 285,8$ kJ/mol

Netto forbrenningsvarme fremkommer når produktene er i gassform, dvs. $\Delta H_{f, V_{ann}(g)} = 241,83$ kJ/mol

Tabell C.2: Produksjonskonstanter ved godt ventilerte branner

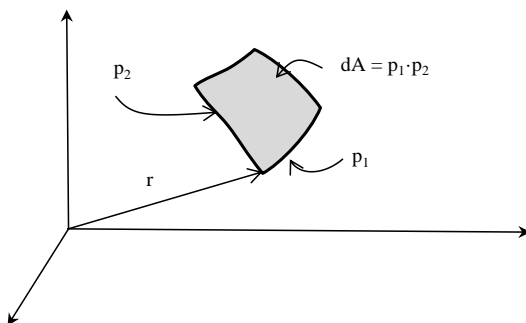
Stoff	Kjemisk formel	y_{CO_2}	y_{CO}	y_s
		(g/g)		
Metan	CH ₄	2,72	-	-
Etan	C ₂ H ₆	2,85	0,001	0,013
Propan	C ₃ H ₈	2,85	0,005	0,024
Butan	C ₄ H ₁₀	2,85	0,007	0,029
Heptan	C ₇ H ₁₆	2,85	0,01	0,037
Octan	C ₈ H ₁₈	2,84	0,011	0,038
Benzen	C ₆ H ₆	2,33	0,067	0,181
Toluen	C ₇ H ₈	2,34	0,066	0,178
Metanol	C ₁ H ₃ OH	1,31	0,001	-
Etanol	C ₂ H ₅ OH	1,77	0,001	0,008

Tillegg D

Kort om romvinkel

Romvinkelen ($d\omega$) benyttes for å beregne strålefluks på et areal som ligger en avstand (r) vekk fra punktet som stråler. Ligningen for romvinkelen er gitt i ligning D.1 med bakgrunn i figur D.1.

$$d\omega = \frac{dA}{r^2} \quad (\text{D.1})$$

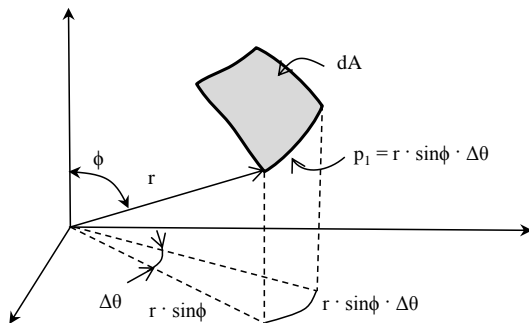
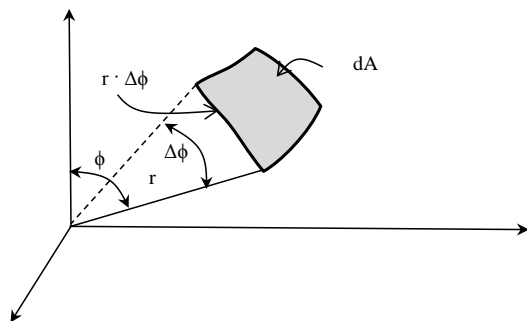


Figur D.1: Et areal (dA) i en avstand r fra punktkilden.

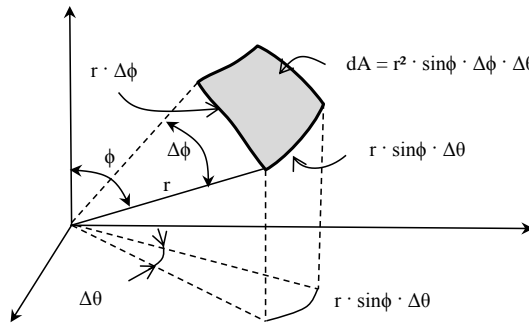
Arealet dA ligger på en halvkule. Det blir antatt at sidene til arealet: p_1 og p_2 , er så små at arealet kan ses på som et rektangel. Ligningen for arealet dA blir da som et ordinært rektangel, se ligning D.2.

$$dA = p_1 \cdot p_2 \quad (\text{D.2})$$

For å kunne bestemme arealet, må p_1 og p_2 bestemmes. I figur D.2 er det skissert opp hvordan p_1 kan bestemmes. Her er det viktig å se at radiusen (r) er projisert ned på xy -planet og så multiplisert med vinkelen $\Delta\theta$. Når radiusen er projisert ned på xy -planet kan lengder beregnes ved å bruke teorien for radianer.

Figur D.2: Side p_1 i dA .Figur D.3: Side p_2 i dA .

I figur D.3 er det skissert opp hvordan p_2 kan bestemmes. Videre er alle elementene for å bestemme dA skissert i figur D.4.



Figur D.4: Samlet skisse for beregning av dA .

Når dA er bestemt, kan romvinkelen $d\omega$ bestemmes:

$$d\omega = \frac{dA}{r^2} \quad (\text{D.3})$$

$$= \frac{r^2 \sin\phi \Delta\phi \Delta\theta}{r^2} \quad (\text{D.4})$$

$$= \sin\phi \Delta\phi \Delta\theta \quad (\text{D.5})$$

Bibliografi

- [1] Rikke Åserud. Brannsikkerhet i en søyle. *Huseiernes Landsforbund*, 6, 2008.
- [2] Mildrid Arianson and Hilde T. Hardang. *Rømning av eldre mennesker i private boliger*. Høgskolen Stord/Haugesund, Haugesund, 2011.
- [3] Arvind Atreya. *Convection Heat Transfer*. The SFPE handbook of fire protection engineering. National Fire Protection Association, Quincy, MA, first edition, 1988.
- [4] Vytenis Babrauskas. *Ignition Handbook: Principles and Applications to Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management and Forensic Science*. Fire Science Publishers/SFPE, Issaquah, WA, 2003.
- [5] Paula F. Beever. *Self-Heating and Spontaneous Combustion*. The SFPE handbook of fire protection engineering. National Fire Protection Association, Quincy, MA, second edition, 1995.
- [6] Adrian Bejan. *Heat Transfer*. John Wiley & Sons. Inc, New York, 1993.
- [7] Lars G. Bengtsson and Björn Karlsson. *Fenomenen övertändning, backdraft och brandgaseksplosion*. Räddningsverket, 1997.
- [8] Craig Beyler. *Flammability Limits of Premixed and Diffusion Flames*. The SFPE handbook of fire protection engineering. National Fire Protection Association, Quincy, MA, second edition, 1995.
- [9] Nils C. Boye. *Kjemi for Ingeniører*. Universitetsforlaget AS, 1986.
- [10] John L. Bryan. *Fire suppression and detection systems*. Macmillan Publishing Co, Inc, second edition, 1982.
- [11] John L. Bryan. *Automatic sprinkler and standpipe systems*. National Fire Protection Association, Inc, Quincy, MA, second edition, 1990.
- [12] John L. Bryan. *Behavioral Response to Fire and Smoke*, pages 3–320–3–354. The SFPE handbook of Fire Protection Engineering. National Fire Protection Association, Quincy, Ma, USA, 4 edition, 2008.
- [13] Andrew H. Buchanan. *Structural Design for Fire Safety*. John Wiley & Sons. Ltd, Chichester, 2001.

- [14] Richard W. Bukowski, Robert J. O'Laughlin, and Charles E. Zimmerman. *Fire Alarm Signaling System Handbook*. National Fire Protection Association, Inc, Quincy, MA., 1987.
- [15] Horatio S. Carslaw and John C. Jaeger. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, second edition, 1959.
- [16] Jonathan Crowther. *Oxford Advanced Learner's Dictionary of Current English*. Oxford University Press, fifth edition, 1995.
- [17] Ulf Danielsen. Brannskader i Norge. Teknisk rapport, SINTEF NBL, 1991.
- [18] Direktoratet for samfunnsikkerhet og beredskap. Velg riktig brannsløkkeutstyr. <http://www.sikkerhverdag.no/brann/slokke-brann/velg-riktig-brannsløkkeutstyr/> dato: 08-11-2017.
- [19] Direktoratet for samfunnsikkerhet og beredskap. DSB Databanker: Statistikk for området: 01.01.2 omkomne i brann fra og med 2009. Teknisk rapport, 2013.
- [20] Direktoratet for samfunnsikkerhet og beredskap. Brannene i Lærdal, Flatanger og på Frøya vinteren 2014. Teknisk rapport, 2014.
- [21] Roy J. Dossat. *Principles of Refrigeration*. Prentice Hall, third edition, 1991.
- [22] Peter Drabløs and Nils C. Boye. *Kjemi i Teori og Praksis*. Universitetsforlaget AS, 1995.
- [23] Geir Drangsholt and Bjørn Egil Rossebø. Vanntåkeanlegg i omsorgsboliger. Teknisk rapport, SINTEF NBL, 2006.
- [24] Dougal Drysdale. *Thermochemistry*. The SFPE handbook of fire protection engineering. National Fire Protection Association, second edition, 1995.
- [25] Dougal Drysdale. *Review Paper: Mechanisms of Flashover: An Overview*. Conference Proceeding of the Seventh International Interflame Conference. Interscience Communication Limited, 1996.
- [26] Dougal Drysdale. *An Introduction to Fire Dynamics*. Wiley, Chichester, 3 edition, 2011.
- [27] Atle Dyregrov. *Barn og traumer: en håndbok for foreldre og hjelpere*. Fagbokforlaget, Bergen, 3 edition, 2010.
- [28] Rolf K. Eckhoff. *Elektrisk utstyr for eksplosjonsfarlige områder*. Tapir, 1996.
- [29] Linus Eriksson and Magnus Mattsson. *Taktikboken: En handbok i hur man på ett scenariobaserat sätt genomför effektiva insatser vid brand i byggnad*. Informationsbolaget, Malmö, 2010.

- [30] Ben Evarts. *Physical disability as a factor in home fire deaths*. National Fire Protection Association, Fire Analysis and Research Division, Boston, USA, sept - okt edition, 2011.
- [31] Finans Norge. BRASK - brannskadestatistikk, 2015.
- [32] C. M. Fleischmann, P. J. Pagni, and R. B. Williamson. *Quantitative Backdraft Experiments*. Proceeding of the Fourth International Symposium. International Association for Fire Safety Science, 1994.
- [33] Raymond Friedman. *Principles of Fire Protection Chemistry*. National Fire Protection Association, second edition, 1989.
- [34] Raymond Friedman. *Theory of Fire Extinguishment*. Fire Protection Handbook. National Fire Protection Association, Inc, seventeenth edition, 1991.
- [35] William F. Ganong. *Review of Medical Physiology*. Appleton & Lange, fifteenth edition, 1995.
- [36] Georg Gjessen. *Brannvern og brannteknikk*. Tapir, 1992.
- [37] Casey C. Grant. *Halon Design Calculations*. The SFPE handbook of fire protection engineering. National Fire Protection Association, Quincy, MA, second edition, 1995.
- [38] J. F. Griffiths, J. A. Barnard, and J. N. Bradley. *Flame and combustion*. Blackie, London, third edition, 1995. pg. 145.
- [39] John F. Griffiths and John A. Barnard. *Flame and Combustion*. Blackie Academic & Professional, third edition, 1995.
- [40] William L. Haberman and James E. A. John. *Engineering thermodynamics with heat transfer*. Allyn and Bacon, second edition, 1989.
- [41] Andrew R. Hale and A. Ian Glendon. *Individual behaviour in the control of danger*. Elsevier, Amsterdam, 1987.
- [42] John R. Hall and Arthur E. Cote. *America's Fire Problem and Fire Protection*. Fire Protection Handbook. National Fire Protection Association, Inc., seventeenth edition.
- [43] David Halliday and Robert Resnick. *Fundamentals of physics*, volume One. John Wiley & Sons. Inc, third edition, 1988.
- [44] Finn Hallseth, John Haugan, Karsten E. Hjelmen, and Anders Isnes. *Fysikk for Ingeniører*. NKI Forlaget, 1990.
- [45] T. Z. Harmathy. Ten rules of fire endurance rating. *Fire Technology*, 1(2):93–102, 1965.

- [46] Gordon E. Hartzell, editor. *Advances in combustion toxicology : Vol. 1*, volume 1. Technomic Publishing Company, Lancaster, Pa, 1989.
- [47] Morten Helbæk. *Fysikalsk kjemi*. Fagbokforlaget, 1999.
- [48] Gunnar Heskestad. *Fire Plumes*. The SFPE handbook of fire protection engineering. National Fire Protection Association, second edition, 1995.
- [49] J. O. Hinze. *Turbulence*. McGraw-Hill, second edition, 1975.
- [50] Jack P. Holman. *Heat transfer*. McGraw-Hill, London, 7th edition, 1992.
- [51] Home Office (Fire Department), UK. *Fire protection of buildings*. 1990. Manual of Firemanship, Book 9.
- [52] Institutt for husbyggingsteknikk NTH. Husbyggingsteknikk 1. Teknisk rapport, 1991.
- [53] Charles Henry Edwards Jr. and David E. Penny. *Calculus and Analytic Geometry*. Prentice-Hall International, second edition, 1986.
- [54] Justis- og beredskapsdepartementet. Forskrift om håndtering av brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff samt utstyr og anlegg som benyttes ved håndteringen, 2009.
- [55] Justis- og politidepartementet. Stortingsmelding nr. 35 (2008 - 2009) Brannsikkerhet Forebygging og brannvesenets redningsoppgaver. Teknisk rapport, www.regjeringen.no, 2009.
- [56] Ditsa Kafry. *Playing with Matches: Children and Fire*. David Fulton Publisher, second edition, 1991.
- [57] A. Murty Kanury. *Introduction to combustion phenomena: (for fire, incineration, pollution, and energy applications)*. Gordon and Breach, New York, 1975. pg. 95-98.
- [58] A. Murty Kanury. *Ignition of Liquid Fuels*. The SFPE handbook of fire protection engineering. National Fire Protection Association, second edition, 1995.
- [59] Björn Karlsson and James G. Quintiere. *Enclosure fire dynamics*. CRC Press, Boca Raton, 2000.
- [60] John H. Klote and James A. Milke. *Design of Smoke Management systems*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Condition Engineers, Inc, 1992.
- [61] John M. Kote, James A. Milke, Paul A. Turnbull, Ahmed Kashef, and Michael J. Ferreira. *Handbook of smoke control engineering*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, Ga, 2012.
- [62] T. T. Lie, editor. *Structural fire protection: A SCE Manual no. 78*. American Society of Civil Engineers, 1992.

- [63] T. T. Lie. *Fire Temperature-Time Relations*. The SFPE handbook of fire protection engineering. National Fire Protection Association, second edition, 1995.
- [64] Guttorm Liebe. *Brannfysikk*. Norsk Brannvernforening, 1995.
- [65] Guttorm Liebe. *Brannfysikk: fra teori til praksis*. Norsk brannvernforening, Oslo, 3 edition, 2015.
- [66] Amable Linan and Forman A. Williams. *Fundamental Aspects of Combustion*. Oxford University Press, 1993.
- [67] Asbjørn Markestad and Magne Maage. *Bygningsmateriallære*, volume Two. Tapir A/S, 1978.
- [68] Øystein Meland, Eimund Skåret, and Geir Jensen. *Røykkontroll*. SINTEF, 1989.
- [69] Donald N. Meldrum. *Foam Extinguishing Agents and Systems*. Fire Protection Handbook. National Fire Protection Association, Inc, seventeenth edition, 1991.
- [70] Stanley Middleman. *An Introduction to Mass and Heat Transfer: Principles of Analysis and Design*. John Wiley & Sons. Inc, 1998.
- [71] Antony F. Mills. *Heat Transfer*. Irwin, 1992.
- [72] Wayne D. Moore. *Automatic Fire Detectors*. Fire Protection Handbook. National Fire Protection Association, Inc, seventeenth edition, 1991.
- [73] Michael J. Moran and Howard N. Shapiro. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons. Inc, second edition, 1993.
- [74] Bodil Aamnes Mostue and Vidar Stenstad. *Brannskadeutviklingen i Norge sammenlignet med andre nordiske land*. Teknisk rapport, SINTEF NBL, 2005.
- [75] Krishna S. Mudan and Paul A. Croce. *Fire Hazard Calculation for Large Open Hydrocarbon Fires*. The SFPE handbook of fire protection engineering. National Fire Protection Association, second edition, 1995.
- [76] National Fire Protection Association, Inc. *Nfpa 750, standard for the installation of water mist fire protection systems*. Technical report, 1996.
- [77] Margareta Nisser. *Utrymningssäkerhet för rörelsehindrade*. Teknisk rapport, Statens räddningsverk, 2001.
- [78] Norges Brannskole. *Brev 4, Brann- og redningsmateriell, utstyr, vannforsyning til brannsløkking*. 1987.
- [79] Products Research Committee. *Fire research on cellular plastics: The final report of the products research committee (prc)*. Technical report, 1980.

- [80] David A. Purser. *Toxicity Assessment of Combustion Products*. The SFPE handbook of fire protection engineering. National Fire Protection Association, second edition, 1995.
- [81] John A. Rockett and James A. Milke. *Conduction of heat in solids*. The SFPE handbook of fire protection engineering. National Fire Protection Association, second edition, 1995.
- [82] Stefan Särdaqvist. *Vatten och andra släckmedel*. Räddningsverket, Karlstad, 2 edition, 2006.
- [83] Christian Sesseng, Karoline Storesund, and Bodil Aamnes Mostue. Vurdering av brannvesenet - kvaliteten i brannvesenets brannforebyggende arbeid. Teknisk rapport, SINTEF NBL, 2011.
- [84] T. J. Shields and G. W. H. Silcock. *Buildings and Fire*. Longman Scientific & Technical, 1987.
- [85] Robert Solomon. *Automatic Sprinkler Systems*. Fire Protection Handbook. National Fire Protection Association, Inc, seventeenth edition, 1991.
- [86] Standard Norge. NS-EN 13501-2:2007+A1:2009: Brannklassifisering av byggevarer og bygningsdeler - Del 2: Klassifisering ved bruk av resultater fra brannmotstandsprøving, unntatt ventilasjonssystemer, 2009.
- [87] Statens havarikommisjon for transport. Rapport om undersøkelse av sjøulykke Nordlys-LHCW Brann om bord under innseiling til Ålesund 15. september 2011. Teknisk rapport, 2013.
- [88] Paul Stollard and John Abrahams. *Fire from First Principles*. Chapman & Hall, 1991.
- [89] Gary Taylor. *Halogenated Agents and Systems*. Fire Protection Handbook. National Fire Protection Association, Inc, seventeenth edition, 1991.
- [90] Archibald Tewarson. *Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires*. The SFPE handbook of fire protection engineering. National Fire Protection Association, second edition, 1995.
- [91] The Geneva Association. World fire statistics no. 28. Technical report, The Geneva Association, 2012.
- [92] Lindon C. Thomas. *Heat Transfer*. Prentice-Hall, 1992.
- [93] William D. Walton and Phillip H. Thomas. *Estimating Temperatures in Compartment Fires*. The SFPE handbook of fire protection engineering. National Fire Protection Association, second edition, 1995.

-
- [94] J. Warnatz, U. Maas, and R. W. Dibble. *Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*. Springer, Berlin, 4 edition, 2006.
- [95] R. C. Weast. *Handbook of Chemistry and Physics*. Chemical Rubber Company, 1974/75.
- [96] Gunnar Wold. *Forebyggende brannvern med internkontroll*. Teknologisk Institutt, 1992.
- [97] Michael G. Zabetakis. *Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors, Bulletin 627*. U.S. Dept of the Interior, Bureau of Mines, 1965.
- [98] Robert G. Zalosh. *Explosion Protection*. The SFPE handbook of fire protection engineering. National Fire Protection Association, second edition, 1995.
- [99] Steven S. Zumdahl. *Chemistry*. D. C. Heath and Company, second edition, 1989.

Register

A	
ABC-pulver	<i>Se</i> pulvertyper
absolutt nullpunkt	85
absorpsjon	87
adiabatisk flammetemperatur	
beregning	185
tabell	185
teori	183
aggregattilstand	39, 47
aktivt brannvern	221
antennelse	189
fast stoff	197
flammepunkt	196
gass	195
med tennkilde	195
selvantennelse	20, 198
spontanantennelse	20, 199
termisk eksplosjon	189
uten tennkilde	198
volum	193
væske	196
antennelsefase	15, 19
antennelsestemperatur	197
avkjølingsfase	
seutbrenningsfase	22
Avogadros lov	139
Avogadros tall	140
B	
backdraft	24, 26
beskyttelse	268
isolering	268
overdimensjonering	268
varmekapasitet	268
beskyttelse av bygningsdeler	268
Biot-tall	122
black body	<i>Se</i> svart legeme

brann	
alder	8
antall omkomne	3
barn	4
eldre	8
kjønnsforskjeller	4
samfunn	3
universell utforming	8
brannalarmanlegg	227
branndeteksjon	227
brannfase	19
brannfirkant	151, 155, 237
brannforløp	15
brannkjemi	151
brannmotstand	260
begrep	260
beskyttelsesmekanismer	261
dehydrering	262
gamle betegnelser	260
integritet	260
isolasjon	260
lastbærende	260
materialtykkelse	261
refleksjon	262
termisk moment	261
brannslukking	<i>Se</i> slukking
brannsmitte mellom bygg	271
brannspredning	43, 47
flyvebrann	46
konveksjon	44
mekanismer	43
mellom bygg	28
flyvebrann	29
varmestråling	28
mellom etasjer	26
mellom rom	26

- varmeledning 43
varmestraling 44
brannstatistikk 3
 tap av liv 3
 økonomiske tap 8
branntetraeder 151
branntrekant 151
branntype 238
brannvern
 aktivt 221
 forebyggende 222
 offentlig 222
 privat 223
 passivt 221
 perspektiv 221
 teknisk 224
 total 221
brennbarhetsdiagram 174
brennbarhetsgrense 168
 brennbarhetsdiagram 174
 enkelt gass 169
 flere gasser 169
 normal tilstand 169
 temperatur 171
 trykk 171
brensel 151
brenselkontrollert 21
bygningmateriale
 betong 269
 stål 269
 tre 268
- C**
- CO₂ *Se* karbondioksid
- D**
- Daltons lov 141
Debye-temperatur 51
deteksjon 227
detektor
 flamme 234
 røyk 231
 varme 229
diffusjonsflamme 177
 kjennetegn 181
 oppbygging 179
 sot 182
 varmestraling 182
- E**
- ekspansjonstall 80
eksplosjonsgrense .. *Se* brennbarhetsgrense
emissivitet 89, 110
empiriske tall 72
energi 33, 153
 indre 34
 kinetisk 34
 potensiell 34
energimengde 40, 51
energioverføring 71
energiproduksjon 158
entalpi 172
- F**
- fenomen 23
 backdraft 24
 overtenning 23
flamme 177
 adiabatisk 183
 diffusjon 179
 diffusjonsflamme 177
 forblandet 177
flammedetektor 234
 infrarød 234
 ultrafiolett 235
flammehøyde 211
flammepunkt 196
flyvebrann 46
forblandet flamme 177
 kjennetegn 179
 oppbygging 177
forbrenning
 brenselfattig 155, 156
 brenselkontrollert 156
 brenselrik 155, 156
 fullstendig 155
 ventilasjonskontrollert 156
Forbrenningsvarme 158
forebyggende brannvern 222
Formasjonsvarme 158

- Fouriers lov 47, 49
 frie radikaler *Se* kjedereaksjon
 frie elektroner 47
 fritt radikal 154
 fullt utviklet rombrann 15, 21
- G**
- gass 243
 aktiv gass 243
 inert gass 243
 kjedereaksjon 243
 system 240
 tilgjengelighet 240
 gasskonstant 138
 gasslov 137
 Avogadros lov 139
 Boyles lov 138
 Gay-Lussacs lov 138
 ideell 137
 gasstetthet 143
 generell kjemi *Se* kjemi
 geometrisk synsfaktor 91, 98
 global oppvarming 239
 grå legemer 89
- H**
- halon 239, 244
 frie radikaler 244
 generelt forbud 244
 giftighet 244
 kjedereaksjon 244
 personfare 244
 Harmathys regler 262
 HC-brann 272
 hydrokarbon-brann 272
 hypertermia 205
- I**
- ideell gasslov 137
 Daltons lov 141
 indre energi 34
 inhibitor-gasser 244
 intensitet 91
 ISO-834 272
- J**
- Joule 40
- K**
- kalorimetri 163
 karakteristisk lengde 75
 karbondioksid 239, 243
 lungefunksjonene 243
 oksygen fortrenkning 243
 oksygenmangel 244
 personskade 239
 respirasjonsfrekvens 243
 kinetisk energi 34, 47
 kjedereaksjon 154, 237
 kjemisk reaksjonsligning *Se*
 reaksjonsligning
 kompleks konstruksjon 55
 konveksjon 39, 44, 71
 geometrisk utforming 71
 hastighet 71
 naturlig 72, 79
 tvungen 72, 76
 varmekapasitet 71
 viskositet 71
 konveksjonsfaktor 72, 73, 77
- L**
- laminær 74
 laminær strøm 76
- M**
- materialer i serie 55
 miljøsikkerhet 239
 motstrøm 252
- N**
- Newtons lov 71
 kjøling 71
 Nussel-tall 77, 79
- O**
- oksygen 153
 oppdrift 249
 oppvarming 121
 organisatoriske tiltak 222
 overoppheting 205

- overtening 23
 ozonlaget 239
- P**
- parallele materialer 58
 partialtrykk 141
 passivt brannvern 221, 259
 personsikkerhet 239
 perspektiv 221
 pilot 198
 potensiell energi 34
 Prandtl-tall 77
 pulsering 26
 pulver 244
 kjedereaksjon 244
 slukkemiddel 244
 system 240
 tilgjengelighet 240
 typer 244, 245
 varmeproduksjon 244
 pulvertyper 244, 245
 pyrolyse 22, 153
- R**
- Rayleigh-tall 80
 reaksjonsligning
 kjemiske 133
 reaksjonsligninger
 balansering 133
 produkt 133
 reaktant 133
 refleksjon 87
 Reynolds tall 74
 rombrann 15
 romvinkel 92, 289
 røyk
 definisjon 203
 forbrenningsprodukt 206
 produksjon 210
 produksjonsligning 212, 214
 røykdeteksjon
 lysdempning 232
 lysspredning 232
 røykdetektor 231
 ionisk 232
 optisk 232
 røykkontroll 247, 252
 aktiv 252
 forsert avtrekk 252
 motstrøm 252
 passiv 255
 termisk ventilasjon 256
 tette barrierer 258
 trykksetting 252
 røykplume *Se røyksøyle*
 røykproduksjon 203
 røykskade 204
 objekt 206
 kjemisk 206
 termisk 206
 person 204
 termisk 205
 toksikologisk 204
 røykspredning 247
 drivkrefter 248
 oppdrift 249
 skorsteinseffekt 248
 termisk ekspansjon 249
 ventilasjonsåpninger 249
 vindkrefter 249
 røyksøyle 16, 210
 røyksøyleteori 210
- S**
- seksjonering 270
 branncelle 270
 brannseksjon 270
 brannvegg 271
 sekundærskade 239
 selvantennelse 20, 198
 skorsteinseffekt 248
 skum 242
 kastelengde 243
 skumdannende væske 242, 243
 skumtall 243
 skumtype 243
 lettskum 242
 mellomskum 242
 tungtskum 242
 skumvolum 243

- slukkemiddel 238
 valg av 238
 slukkesystem 238
 slukking 237
 teori 237
 spesifikk varmekapasitet 40, 51
 spesifikk varmeledningsevne 48
 spontanantennelse 20, 199
 sprinklerhode 241
 dekningsareal 241
 smelteledd 241
 varmedetektor 241
 sprinklersystem 240
 standardbrann 272
 Stefan-Boltzmanns konstant 86
 strømningshastighet 75
 svart legeme 86, 88
 synsfaktor 91, 96, 98
 synsfaktordiagram 98
- T**
- teknisk brannvern 224
 temperaturforskjell 79
 temperaturgradient 48
 termisk ekspansjon 249
 termisk eksplosjon 189
 termisk motstand 56
 termisk tynde objekter 122
 termisk ventilasjon 256
 termodynamikk 35
 andre lov 37
 første lov 36
 tetthetsforskjell 79
 tid-temperaturkurve 272
 tilgjengelighet 240
 total brannsikring 221
 transmisjon 87
 turbulens 74
 turbulent strøm 76
- U**
- utbrenningsfase 15, 22
 utstrålingsevne 89
- V**
- vann 240
 fordampe 240
 fortrengning 240
 volumøkning 240
 vannnåkesystem 242
 dråpestørrelse 242
 halonerstatter 242
 vanndråpe 242
 varme 33
 transportmetode 39
 varmedetektor 229
 maksimumstemperatur 229
 restaurerbare 229
 sprinklerhode 229
 temperaturdifferensial 229
 termoelement 231
 varmeffluks 40
 varmekonveksjon *Se* konveksjon
 varmeledning 39, 43, 47, 71
 elektiskanalog 56
 endimensjonal 52
 flerdimensjonal 49, 52
 generell ligning 50
 konstant 47
 materiale i serie 55
 oppvarming 121
 stasjonær 47, 52
 termisk tynde objekter 122
 transient 121
 transient system 51
 utstrålingsevne 89
 varmeledningsevne
 temperaturavhengig 54
 varmeledningstall 54
 varmelære 33
 varmemengde 40
 varmeovergang 40
 varmestraling 39, 40, 44, 85
 flamme 107
 grå legeme 105
 husbrann 108
 praktiske eksempler 107
 svart legeme 88
 varmestrom 40
 varmestromstetthet 40

varmetransport	39
kombinasjoner	113
stasjonær	40
transient	40
vekstfase	15, 20
ventilasjonskontrollert	22
ventilasjonsåpninger	249
verditap	
andre land	9
bakgrunn	11
Norge	8
vindkrefter	249
virtuelt origo	213
viskositet	
dynamisk	77
kinematisk	75

Bjarne Christian Hagen har tatt mastergraden sin ved Universitetet i Maryland og doktorgraden sin ved Universitetet i Bergen. Han har arbeidet ved Høgskulen på Vestlandet siden 1995, videre har han arbeidet ved Gassco og Rogaland Brann og Sikkerhet (RBS).

Hagen er i dag Førsteamanuensis ved Institutt for Brannsikkerheit og HMS ved Høgskulen på Vestlandet.

Boken Grunnleggende brannteknikk gir en introduksjon i brann og brannvern. Boken er skrevet på en lettfattelig måte slik at lesere med forskjellig bakgrunn vil ha utbytte av å lese den.

Følgende emner er presentert:

- Brann og samfunn
- Brannutvikling
- Varmelære
- Varme- og røykproduksjon
- Brannvern:
 - ◊ Deteksjon
 - ◊ Slukking
 - ◊ Røykkontroll
 - ◊ Passivt brannvern