

**Flammer
og
Adiabatisk Flammentemperatur**

Bjarne Christian Hagen

Copyright ©Bjarne Christian Hagen, 2003

Forside: Bjarne CHR. Hagen

ISBN: 82-996645-0-0

Det må ikke kopieres fra denne boken i strid med åndsverkloven, fotografloven eller i strid med avtaler om kopiering inngått med KOPINOR, interesseorgan for rettighetshavere til åndsverk.

Forord

Hensikt

Hensikten med heftet er å gi en beskrivelse av flammetyper, samt en kort introduksjon av begrepet adiabatisk flammetemperatur. Materialet er forsøkt fremlagt på en lettfattelig måte slik at lesere med forskjellig bakgrunn vil ha utbytte av å lese om emnet.

For å få et best mulig utbytte av seksjonen om adiabatisk flammetemperatur, bør leseren ha gjennomført et kjemifag enten ved videregående skole eller høyskole/universitet.

Kilder til inspirasjon

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 heftet.

Bjarne CHR. Hagen

Haugesund - 2003

Innhold

1	Flamme	1
1.1	Forblandet flamme	1
1.1.1	Oppbygging av en forblandet flamme	1
1.1.2	Kjennetegn på forblandet flamme	3
1.2	Diffusjonsflamme	3
1.2.1	Oppbygging av en diffusjonsflamme	4
1.2.2	Kjennetegn på diffusjonsflamme	5
2	Adiabatisk flammetemperatur	8
2.1	Teoretisk utledning	8
2.2	Beregningseksempler	11
3	Temperaturavhengige C_p	14
3.1	Interpolering	14
3.2	Beregning	18
4	Termodynamisk tabell	21
	Referanser	23
	Register	24

Symboler

C_p - Spesifikk varmekapasitet ved konstant trykk ($J/^\circ C \text{ mol}$)

T - Temperatur ($^\circ C$) (K)

\dot{q} - Varmemengde pr. tidsenhet (W)

m - Masse (kg)

\dot{m} - Masse pr. tidsenhet (kg/s)

ΔH_C - Forbrenningsvarme (J/kg)

χ - Forbrenningseffektiviteten (-)

Subscript

f - Henviser til flammens egenskaper

o - Henviser til omkringliggende gasegenskaper

Tall - Henviser til et spesifikt element eller situasjon

Annet

[] - Henviser til referanser på side 24

() - Se nummererte ligninger

Tall 1 - 7: Se fotnote nederst på samme side

1 Flamme

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 [1]. 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 stråling, 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.

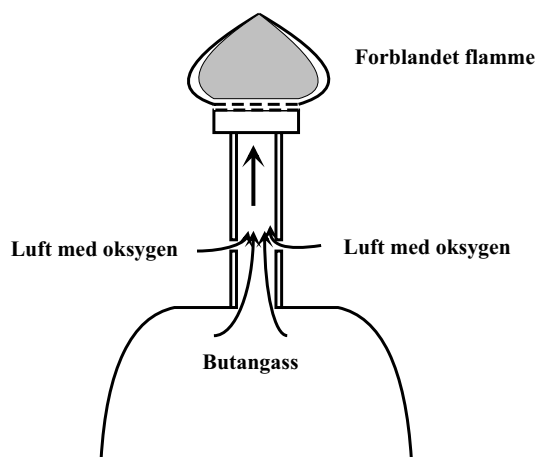
1.1 Forblandet flamme

Flammer hvor brensel og oksygen blandes før forbrenningssonen, omtales som forblandete flammer [1, 3]. Forblandete flammer benyttes i forbindelse med brennere som for eksempel butan-brennere¹ 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. Blir blandingen antent, vil en kuleformet flammefront spre seg utover i rommet. Flammefronten vil være svakt blålig, noe som er et kjennetegn for forblandete flammer [2].

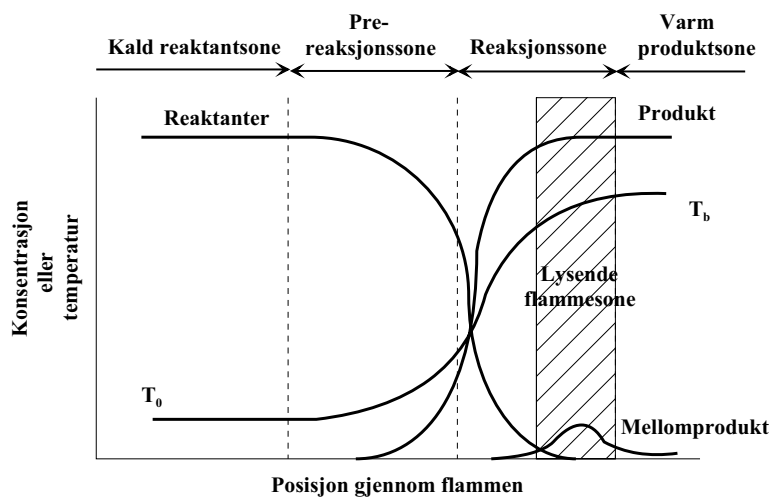
1.1.1 Oppbygging av en forblandet flamme

En forblandet flamme består av fire forskjellige soner som alle inngår i selve forbrenningssonen: kald reaktantsone, pre-reaksjonssone, reaksjonssone og varm produktzone [3]. De forskjellige sonene er skissert i figur 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

¹Denne type gassbrenner er de fleste kjent med fra kjemilaboratorier, speider-turer o.l.



Figur 1: Illustrasjon av prinsippet for en butanbrenner



Figur 2: Illustrasjon av forbrenningszone [3]

dekomponere, og det blir 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 [3].

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 [3].

1.1.2 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 [7].

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.

1.2 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

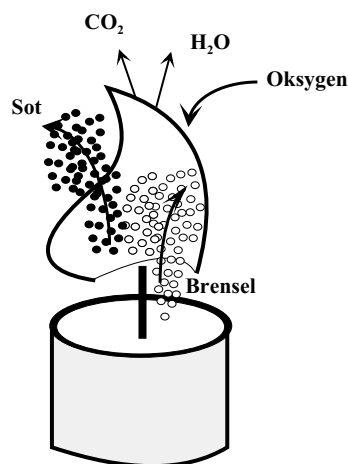
²Forbrenningshastigheten tilsier hvor hurtig flammefronten beveger seg igjennom en gassblanding.

³Med en støkiometrisk blanding menes en ideell blanding av brensel og oksygen.

brenselet og oksygenet bli blandet før forbrenningssonen [3]. Dette medfører forskjeller i strålingsintensitet og produkter mellom de to flammetyperne. 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.

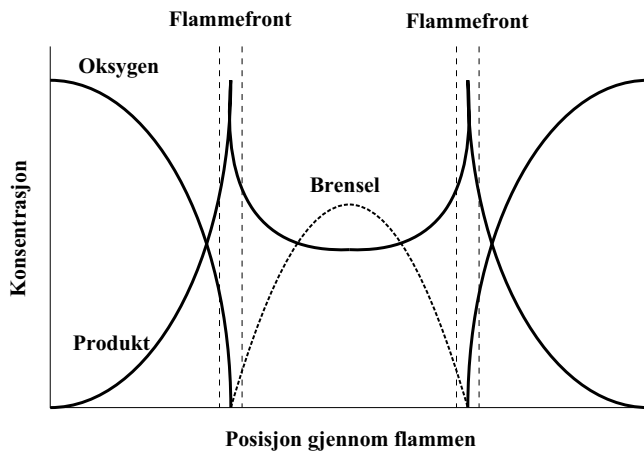
1.2.1 Oppbygging av en diffusjonsflamme

Flammesonen til en diffusjonsflamme er svært heterogen som følge av den manglende blandingen av reaktantene før selve forbrenningssonen. I figur 3 er det gitt en illustrasjon av en diffusjonsflamme. Selve flammen består av tre forskjellige soner: Brenselssonen, Forbrenningssonen og Luftsonen. Som det fremgår av illustrasjonen i figur 4, er det store forskjeller i gassblandingen som befinner seg i de forskjellige sonene.



Figur 3: Skisse av en diffusjonsflamme

I figur 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



Figur 4: Illustrasjon av inndelingen av flammesonen [3]

enn forblandete flammer. Forsøk har vist at sot står for rundt 80% av den avgitte varmestralingen fra en diffusjonsflamme [2].

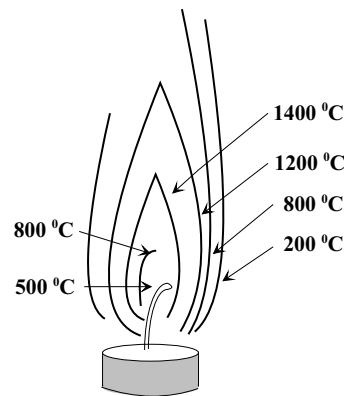
I forbrenningssonen vil det være en meget variert blanding av oksygen, brensel, sot og forbrenningsprodukter. Bredden på selve sonen vil være avhengig av hvor turbulent flammen er, men vanligvis vil forbrenningssonen være tynn med en bredde på et par millimeter [3]. Forbrenningen i flammen er ikke momentan. 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 [3].

Blandingen i luftsonen 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 luftsonen.

1.2.2 Kjennetegn på diffusjonsflamme

Det at flammen til en diffusjonsflamme er heterogen bidrar til flere viktige kjennetegn ved denne type flamme. Et meget viktig kjen-

netegn er at temperaturen i flammen vil variere sterkt i henhold til posisjon inne i flammen. I figur 5 er det skissert opp hvordan temperaturen endres gjennom et snitt av flammen. Variasjonene i flamme-temperaturen er et resultat av den relativt smale forbrenningssonen i diffusjonsflammen [3]. Områdene i flammen som ikke er del av forbrenningssonen, vil derfor ha lavere temperatur enn forbrenningssonen.



Figur 5: Skisse av temperaturfordeling i en diffusjonsflamme [5]

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 utstrålingsevne⁴ som er tilnærmet lik et svart legeme, dvs. lik 1 [4]. Den høye utstrålingsevnen 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 [2]. I tabell 1 er det oppgitt hvor mye varmestråling som blir avgitt ved bruk av forskjellig brensel. Hydrogen skiller seg klart ut fra andre typer

⁴Betegnelsen emissivitet er også brukt.

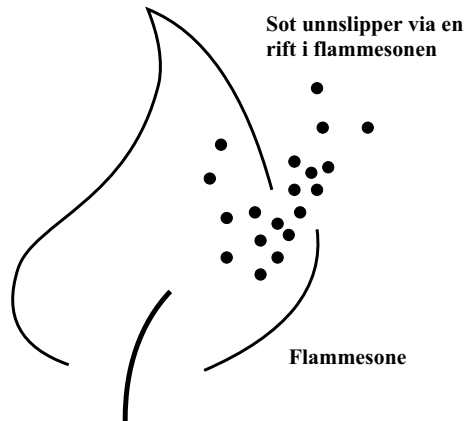
brensel ved at det ikke inneholder karbon, og kan dermed ikke produsere sotpartikler [2].

Tabell 1: Andel energi som stråles vekk fra diffusjonsflammer [2]

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 flammetypene fordi diffusjonsflammen 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. Der hvor det oppstår diskontinuitet, kan uforbrent brensel, sotpartikler og andre dekomponerte elementer fra brenselet slippe ut fra flammen [2]. Disse uforbrente elementene kan 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 brannen. 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 6: Diskontinuerlig forbrenningszone

2 Adiabatisk flammetemperatur

Energien fra den kjemiske reaksjonen i flammen, vil være med på å bestemme flammemetemperaturen. Dersom flammen blir antatt å være adiabatisk, kan den adiabatiske flammemetemperaturen beregnes [7]. Et adiabatisk system er et system som ikke mister energi til omgivelsen som følge av varmetap.

2.1 Teoretisk utledning

I et adiabatisk system vil all energi bli brukt til å øke forbrenningsproduktene temperatur [1, 7]. Ved estimering av flammemetemperaturen 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 [1].

I ligning 1 er det vist hvordan all energi brukes til å øke temperaturen i produktene fra forbrenningssonen.

$$\delta q = nC_p \delta T \quad (1)$$

eller

$$\dot{q} = nC_p[T_f - T_0] \quad (2)$$

$$T_f = \frac{\dot{q}}{nC_p} + T_0 \quad (3)$$

hvor:

nC_p er summen av de vektete spesifikke varmekapasitetene til forbrenningsproduktene.

T_f er den adiabatisk flammtemperatur.

T_0 er begynnelsestemperaturen. I Norge antas en temperatur på 20 °C.

\dot{q} er varmeproduksjonen, se ligning 4.

$$\dot{q} = \dot{m}\chi\Delta H_C \quad (4)$$

hvor:

\dot{m} er forbrent masse

χ er forbrenningseffektiviteten

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 [1].
- 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 [1].
- Spesifikk varmekapasitet er avhengig av temperatur, se tabell 2. I denne delen av heftet vil det bli antatt en flammtemperatur på ca. 1500 Kelvin. De spesifikke varmekapasitetene vil bli relatert til denne temperaturen, men interpolering mellom verdiene vil gi bedre estimat på flammtemperatur [1]. Bruk av interpolering og temperaturavhengige verdier vil bli vist i neste kapittel.

Tabell 2: Spesifikk varmekapasitet for noen 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 allikevel viktig ved beregning av volum- og trykkøkninger i forbindelse med brann og eksplosjon, fordi den gir konservative beregninger [1].

Beregninger viser at den maksimale adiabatisk flammtemperatur⁵ vil ligge mellom 2200 K og 2400 K når brenselet er blandet med luft og mellom 3000 K og 3400 K når det er blandet med oksygen [3]. I tabell 3 er det oppgitt adiabatisk flammtemperaturer for noen gasser.

Tabell 3: Adiabatisk flammtemperatur [3]

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
Etyl	C ₂ H ₂	3431	2513

⁵Den maksimale adiabatisk flammtemperatur vil oppnås ved en støkiometrisk blanding, dvs. fullstendig forbrenning av både brensel og oksygen.

2.2 Beregningseksempler

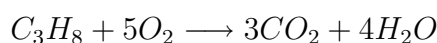
Nedenfor er det gitt to eksempler på hvordan den adiabatisk flammtemperatur kan beregnes. I eksemplene er spesifikk varmekapasitet (C_p) vurdert opp mot en flammtemperatur på 1500 K.

Eksempel 2.1

Beregn 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. Forbrenningsvarmen⁶ (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.

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:

$$\begin{aligned} T_f &= T_0 + \frac{\dot{q}}{nC_P} \\ &= T_0 + \frac{n \cdot \Delta H_C}{nC_P} \\ &= 293K + \frac{2044 \cdot 10^3 J}{363,2 J/K} \\ &= 5921 K \end{aligned}$$

⁶Begrepet forbrenningsvarme er beskrevet i annen brannteknisk litteratur, f. eks. "Grunnleggende Brannteknikk" av Bjarne Christian Hagen.

Den adiabatisk flammtemperatur til propan vil være 5921 K.

Kommentarer:

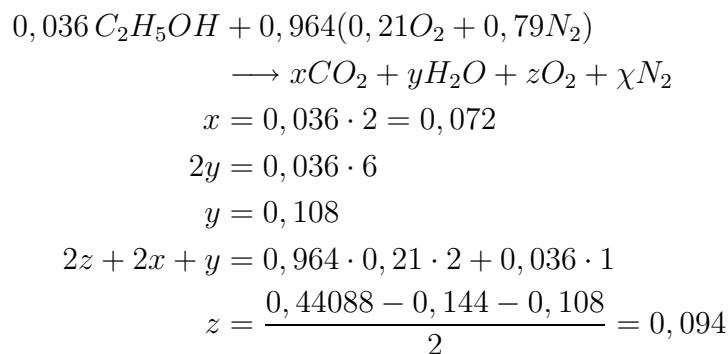
- Det ble antatt en flammtemperatur på 1500 K. I henhold til beregningen er temperaturen mye høyere. Beregningen burde vært gjentatt med nye verdier for de spesifikke varmekapasitetene.
- Beregningsmetoden tar ikke hensyn til en rekke endotermiske kjedereaksjoner som oppstår når temperaturen i forbrenningsonen overstiger 2000 K. Disse endotermiske reaksjonene vil begrense flammtemperatur.

Eksempel 2.2

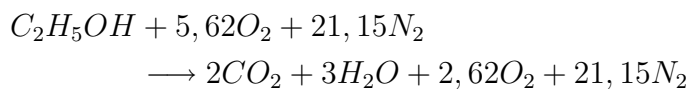
Finn flammtemperatur ved forbrenning av en etanol/luftblanding, som inneholder 3,6 % etanol.

Løsning:

Først må den kjemiske reaksjonsligningen bestemmes.



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 flammentemperaturen til etanol/luftblandingen vil ligge rundt 1500 K. Verdiene 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

Flammentemperaturen blir da:

$$\begin{aligned}
 T_f &= T_0 + \frac{\dot{q}}{nC_P} \\
 &= 293K + \frac{1232 \cdot 10^3 J}{1092 J/K} \\
 &= 1421K
 \end{aligned}$$

Den adiabatiske flammentemperaturen til denne blandingen vil være 1421 K.

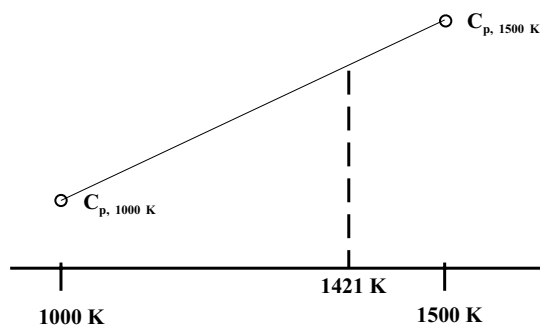
3 Temperaturavhengige C_p

I kapittel 2 ble den adiabatisk flammtemperatur beregnet med en konstant C_p . Det ble antatt at flammtemperatur ville ligge rundt 1500 K, og C_p -verdiene ble hentet fra tabell 2 i henhold til denne temperaturen.

Det fremgår av eksemplene 2.1 og 2.2 at estimatet på en flammtemperatur på 1500 K bare delvis er korrekt. For å få et bedre estimat på flammtemperatur, må C_p -verdiene justeres i henhold til den beregnede temperaturen. Justeringen av C_p kan gjøres enten ved interpolering eller ved beregning. De justerte C_p -verdiene kan deretter benyttes til et nytt og bedre estimat på den adiabatisk flammtemperatur.

3.1 Interpolering

I en del tilfeller har en verdier for C_p hvor temperaturen enten er for høy eller for lav i forhold til den temperaturen som er estimert. I tabell 2 er det oppgitt C_p -verdier for 1000 K og 1500 K, men ikke for 1421 K som det er behov for i eksempel 2.2. For å finne C_p -verdier for denne temperaturen, må det interpoleres mellom de verdiene som er oppgitt.



Figur 7: Illustrasjon til interpolering

Interpoleringen er relatert til figur 7 og gjennomføres som følger:

- a. Først finner en stigningstallet, dvs. hvordan C_p endres for hver grad i intervallet 1000 K til 1500 K.

$$S = \frac{C_{p,1500K} - C_{p,1000K}}{1500 K - 1000 K} \quad (5)$$

- b. For å finne endringen i C_p , multipliseres stigningstallet med differansen mellom temperaturen av interesse og temperaturen for den nedre C_p -verdien.

$$\Delta C_p = (1421 K - 1000 K) \cdot S \quad (6)$$

- c. Den justerte C_p beregnes ved å ta endringen i C_p og addere med C_p -verdien for den minste oppgitte temperaturen.

$$C_{p,1421K} = C_{p,1000K} + \Delta C_p \quad (7)$$

$$= C_{p,1000K} + (1421 K - 1000 K) \frac{C_{p,1500K} - C_{p,1000K}}{1500 K - 1000 K} \quad (8)$$

eller mer generelt

$$C_{p,T} = C_{p,T_1} + (T - T_1) \frac{C_{p,T_2} - C_{p,T_1}}{T_2 - T_1} \quad (9)$$

Ved bruk av interpolerte verdier, kan den adiabatisk flammetemperatur beregnes på nytt. Videre må det vurderes om det er behov for flere interpolasjoner og beregninger for å få estimatet nøyaktig nok.

Eksempel 3.1

I eksempel 2.2 ble flammetemperatur beregnet til 1421 K ved å bruke C_p -verdier for 1500 K. Bruk den beregnede flammetemperatur på 1421 K til å beregne nye C_p -verdier og ny flammetemperatur.

Løsning:

Ligning 9 blir brukt til å beregne de nye C_p -verdiene. Beregningene er vist nedenfor, og svarene er gitt i tabell 4.

Tabell 4: Interpolert C_p -verdier for noen gasser

Temperatur (K)	C_p (J/mol·K)		
	1000	1500	1421
CO ₂	54,31	58,38	57,74
H ₂ O	41,22	47,00	46,09
N ₂	32,70	34,85	34,51
O ₂	34,88	36,56	36,29

$$C_{p,T} = C_{p,T_1} + (T - T_1) \frac{C_{p,T_2} - C_{p,T_1}}{T_2 - T_1}$$

For CO₂:

$$\begin{aligned} C_{p,1421} &= 54,31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) + (1421 \text{ K} - 1000 \text{ K}) \cdot \\ &\quad \frac{(58,38 - 54,31) \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})}{1500 \text{ K} - 1000 \text{ K}} \\ &= 57,74 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

For H₂O:

$$\begin{aligned} C_{p,1421} &= 41,22 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) + (1421 \text{ K} - 1000 \text{ K}) \cdot \\ &\quad \frac{(47,00 - 41,22) \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})}{1500 \text{ K} - 1000 \text{ K}} \\ &= 46,09 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

For N₂:

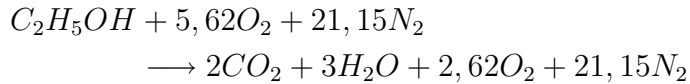
$$\begin{aligned} C_{p,1421} &= 32,70 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) + (1421 \text{ K} - 1000 \text{ K}) \cdot \\ &\quad \frac{(34,85 - 32,70) \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})}{1500 \text{ K} - 1000 \text{ K}} \\ &= 34,51 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

For O_2 :

$$C_{p,1421} = 34,88 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) + (1421 \text{ K} - 1000 \text{ K}) \cdot \frac{(36,56 - 34,88) \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})}{1500 \text{ K} - 1000 \text{ K}}$$

$$= 36,29 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

Når de nye C_p -verdiene er funnet, kan en ny flammtemperatur beregnes. Det blir forbrent en blanding av 3,6% etanol og luft. Den kjemiske reaksjonsligningen er bestemt i eksempel 2.2.



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/luftblanding vil ligge rundt 1421 K. Verdiene for C_p er derfor valgt for denne temperaturen.

Stoff	Antall mol [mol]	$C_{P,1421}$ [J/(K mol)]	nC_P [J/K]
CO ₂	2	57,74	115,5
H ₂ O	3	46,09	138,3
O ₂	2,62	36,29	95,1
N ₂	21,15	34,51	729,9
Sum =			1078,8

Flammtemperaturen blir da:

$$T_f = T_0 + \frac{\dot{q}}{nC_P}$$

$$= 293K + \frac{1232 \cdot 10^3 J}{1078,8 J/K} = 1435 K$$

Den nye adiabatiske flammtemperaturen til denne etanol/luftblanding er estimert til 1435 K.

3.2 Beregning

For noen stoffer er det utarbeidet ligninger for beregning av C_p -verdiene. Ligningene er gitt på formen [3]:

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (10)$$

hvor:

C_p er spesifikk varmekapasitet (J/(mol·K))

a, b, c og d er konstanter, se tabell 5

T er temperatur i Kelvin

Tabell 5: Konstanter for C_p beregninger

Stoff	a	10^2b	10^5c	10^9d	Temperaturintervall (K)
CO	28,14	0,1674	0,537	-2,220	273 - 1800
CO ₂	22,24	5,977	-3,499	7,464	273 - 1800
H ₂ O	32,22	0,1920	1,054	-3,594	273 - 1800
N ₂	27,32	0,6226	-0,095	-	273 - 3800
O ₂	25,46	1,519	-0,715	1,311	273 - 1800

Eksempel 3.2

I eksempel 2.2 ble flammtemperaturer beregnet til 1421 K. Bruk denne temperaturen til å beregne nye C_p -verdier og ny flammtemperatur.

Løsning:

Ligning 10 blir brukt til å beregne de nye C_p -verdiene. Beregningene er vist nedenfor, og svarene er gitt i tabell 6.

Tabell 6: Beregnete C_p -verdier for noen gasser

Temperatur (K)	C_P (J/mol·K)
	1421
CO ₂	57,94
H ₂ O	45,92
N ₂	34,25
O ₂	36,37

For CO₂:

$$\begin{aligned} C_p &= 22,24 + 5,977 \cdot 10^{-2} \cdot 1421 \text{ K} - 3,499 \cdot 10^{-5} \cdot (1421 \text{ K})^2 \\ &\quad + 7,464 \cdot 10^{-9} \cdot (1421 \text{ K})^3 \\ &= 57,94 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

For H₂O:

$$\begin{aligned} C_p &= 32,22 + 0,1920 \cdot 10^{-2} \cdot 1421 \text{ K} + 1,054 \cdot 10^{-5} \cdot (1421 \text{ K})^2 \\ &\quad - 3,594 \cdot 10^{-9} \cdot (1421 \text{ K})^3 \\ &= 45,92 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

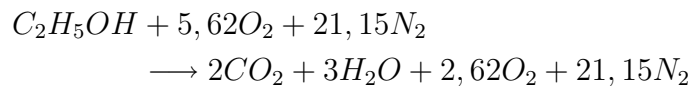
For N₂:

$$\begin{aligned} C_p &= 27,32 + 0,6226 \cdot 10^{-2} \cdot 1421 \text{ K} - 0,095 \cdot 10^{-5} \cdot (1421 \text{ K})^2 \\ &= 34,25 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

For O₂:

$$\begin{aligned} C_p &= 25,46 + 1,519 \cdot 10^{-2} \cdot 1421 \text{ K} - 0,715 \cdot 10^{-5} \cdot (1421 \text{ K})^2 \\ &\quad + 1,311 \cdot 10^{-9} \cdot (1421 \text{ K})^3 \\ &= 36,37 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

Når de nye C_p -verdiene er funnet, kan en ny flammtemperatur beregnes. Det blir forbrent en blanding av 3,6% etanol og luft. Den kjemiske reaksjonsligningen er bestemt i eksempel 2.2.



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 flammemetemperaturen til etanol/luftblandingen vil ligge rundt 1421 K. Verdiene for C_p er derfor valgt for denne temperaturen.

Stoff	Antall mol [mol]	$C_{P,1421}$ [J/(K mol)]	nC_P [J/K]
CO ₂	2	57,94	115,9
H ₂ O	3	45,92	137,8
O ₂	2,62	36,37	95,3
N ₂	21,15	34,25	724,4
		Sum =	1073,4

Flammemetemperaturen blir da:

$$\begin{aligned}
 T_f &= T_0 + \frac{\dot{q}}{nC_P} \\
 &= 293K + \frac{1232 \cdot 10^3 J}{1073,4 J/K} \\
 &= 1441 K
 \end{aligned}$$

Den nye adiabatisk flammemetemperaturen til denne etanol/luftblandingen er estimert til 1441 K.

4 Termodynamisk tabell

Det er utarbeidet tabeller som lister opp flere verdier for den spesi-
fikke varmekapasiteten. I tabellen nedenfor er det oppgitt verdier for
CO, CO₂, H₂O og N₂ fra 100 til 3500 Kelvin [6]

Tabell 7: Spesifikk varmekapasitet C_p

Temperatur (K)	C_p (J/(mol·K))				
	Karbon- monoksid (CO)	Karbon- dioksid (CO ₂)	Vanndamp (H ₂ O)	Nitrogen (N ₂)	Oksygen (O ₂)
100	29,10	29,21	33,31	29,10	29,10
200	29,11	32,36	33,34	29,11	29,12
298	29,14	37,13	33,58	29,12	29,38
300	29,14	37,22	33,58	29,12	29,38
400	29,34	41,33	34,25	29,25	30,00
500	29,79	44,63	35,21	29,58	31,09
600	30,44	47,32	36,30	30,11	32,09
700	31,17	49,56	37,46	30,75	32,98
800	31,90	51,43	38,69	31,43	33,73
900	32,58	53,00	39,94	32,09	34,35
1000	33,18	54,31	41,22	32,70	34,87
1100	33,71	55,41	42,48	33,24	35,30
1200	34,17	56,34	43,70	33,72	35,67
1300	34,57	57,14	44,87	34,15	35,99
1400	34,92	57,80	45,97	34,52	36,29
1500	35,22	58,38	47,00	34,84	36,54
1600	35,48	58,89	47,96	35,13	36,80
1700	35,71	59,32	48,84	35,38	37,04
1800	35,91	59,70	49,66	35,60	37,28
1900	36,09	60,05	50,41	35,79	37,51
2000	36,25	60,35	51,10	35,97	37,74
2100	36,39	60,62	51,74	36,12	37,97
2200	36,52	60,86	52,32	36,27	38,20
2300	36,64	61,09	52,86	36,40	38,42
2400	36,74	61,29	53,36	36,51	38,64
2500	36,84	61,47	53,82	36,61	38,86

fortsetter på neste side.

fortsetter fra foregående side.

Temperatur	C_p (J/(mol·K))				
	Karbon- monoksid (CO)	Karbon- dioksid (CO ₂)	Vanndamp (H ₂ O)	Nitrogen (N ₂)	Oksygen (O ₂)
2600	36,92	61,65	54,25	36,71	39,07
2700	37,00	61,80	54,64	36,80	39,28
2800	37,08	61,95	55,00	36,88	39,48
2900	37,15	62,09	55,35	36,96	39,67
3000	37,22	62,23	55,66	37,03	39,87
3100	37,28	62,35	55,96	37,10	40,05
3200	37,34	62,47	56,24	37,16	40,22
3300	37,39	62,58	56,50	37,22	40,40
3400	37,44	62,68	56,74	37,27	40,56
3500	37,49	62,79	56,97	37,32	40,71

Referanser

- [1] Dougal Drysdale. *An introduction to fire dynamics*. John Wiley & Sons. Inc, second edition, 1998.
- [2] Raymond Friedman. *Principles of Fire Protection Chemistry*. National Fire Protection Association, second edition, 1989.
- [3] John F. Griffiths and John A. Barnard. *Flame and Combustion*. Blackie Academic & Professional, third edition, 1995.
- [4] Krishna S. Mudan and Paul A. Croce. Fire hazard calculation for large open hydrocarbon fires. In Philip J. DeNenno, editor, *The SFPE handbook of fire protection engineering*. National Fire Protection Association, second edition, 1995.
- [5] Products Research Committe. *Fire Research on Cellular Plastics: The Final Report of the Products Research Committe (PRC)*, 1980.
- [6] Roger A. Strehlow. *Combustion Fundamentals*. McGraw-Hill, 1985.
- [7] Jurgen Warnatz, Ulrich Maas, and Dibble Robert W. *Combustion*. Springer, 1996.

Register

A

adiabatisk flammetemperatur	
beregning	11
tabell	10
teori	8

D

diffusjonsflamme	1
kjennetegn	5
oppbygging	4
sot	6
varmestråling	6

F

flamme	1
adiabatisk	8
diffusjon	3
diffusjonsflamme	1
forblandet	1
forblandet flamme	1
kjennetegn	3
oppbygging	1

I

interpolering	14
---------------------	----

S

spesifikk varmekapasitet	
beregning	18
interpolering	14
tabell	21
temperaturavhengig	14