

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
 Institutt for energi- og prosesssteknikk

Kontakt under eksamen:
 Torleif Weydahl, tlf. 73591634 / 92045222

**EKSAMEN I FAG TEP4170
 VARME- OG FORBRENNINGSTEKNIKK
 18. mai 2007 Tid: 15.00 – 19.00**

Tillatte hjelpemidler: D – Ingen trykte eller håndskrevne hjelpemiddel. Bestemt enkel kalkulator.

- Bruk helst ikke rød blyant/penn, det er holdt av for sensuren.
- Les igjennom oppgavene først. Start med den oppgaven du mener du har best innsikt i.
- Skriv klart, det lønner seg.

Merk: Desimaltegn er punktum.

Oppgave 1 – Reynolds-midling

-Nevn med noen stikkord hva som karakteriserer en turbulent strømning.
 Ligningen for bevegelsesmengde kan skrives

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij}) + \rho f_i \quad (1)$$

-Utled den Reynolds-midlede ligningen for bevegelsesmengde. (Alle ledd skal være med, du trenger ikke sette inn modell for τ_{ij} .)
 -Hvorfor bruker vi middelveid-ligninger? Knytt gjerne svaret til første del av oppgaven.

Oppgave 2 – Turbulensviskositet

I den Reynolds-midlede ligningen som du utledet i oppgave 1 kommer det fram ukjente ledd, såkalte turbulensspenninger eller Reynolds-spenninger. Disse kan modelleres etter samme mønster som viskøse (molekylære) spenninger. For konstant tetthet får vi da:

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2)$$

-Hvordan kan vi finne Reynolds-spenningene hvis vi *ikke* bruker denne modellen?
 I ligningen over må også turbulensviskositeten, μ_t , modelleres.
 -Utled Prandtls blandingsveimodell. -Hva blir turbulensviskositeten, μ_t her?
 -Hvordan kan vi modellere μ_t dersom vi løser en ligning for turbulensenergien, k ?
 (Tips: Bruk dimensjonsanalyse som kontroll.)

Oppgave 3 – Isotrop turbulens

-Vis fremgangsmåten for utledning av den eksakte ligningen for turbulensenergi.
De modellerte ligningene for k og ε er:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho P_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \rho P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon}{k} \rho \varepsilon \quad (4)$$

der

$$\rho P_k = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

-Vis hvilke ledd som faller bort ved isotrop turbulens. -Begrunn svaret.

Oppgave 4 – Karakterisering av turbulente flammer

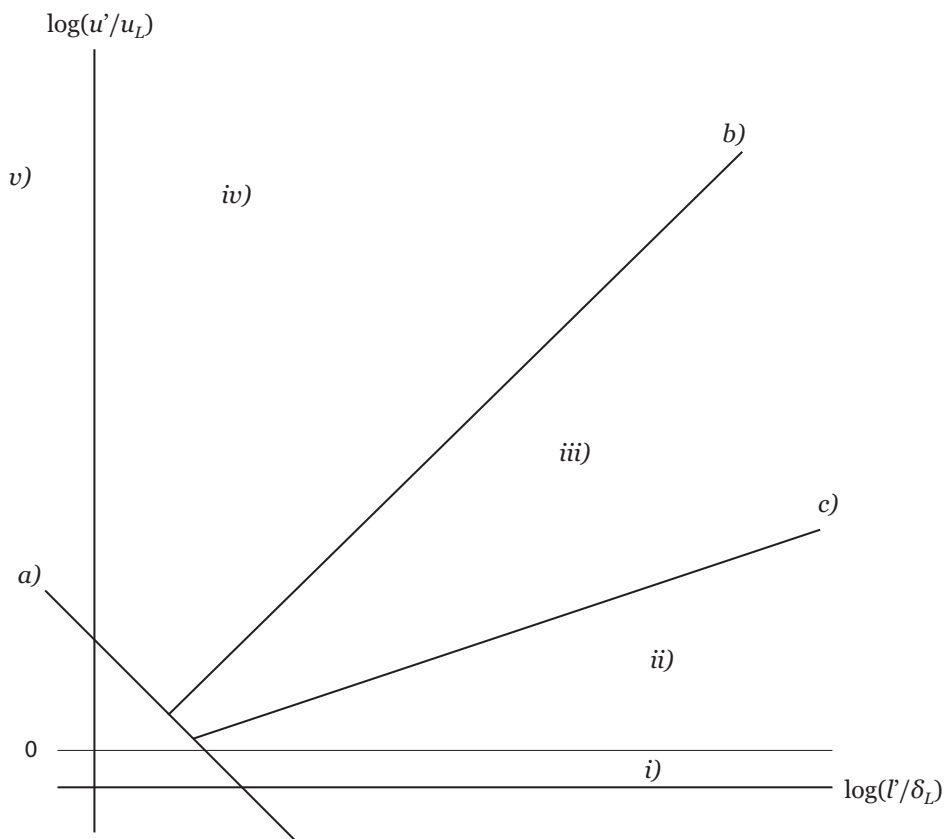
For å karakterisere turbulente flammer trenger vi to uavhengige dimensjonsløse grupper.

I Borghi-diagrammet benyttes u' / u_L , og l' / δ_L . -Forklar hva de 4 størrelsene

u' , u_L , l' og δ_L representerer.

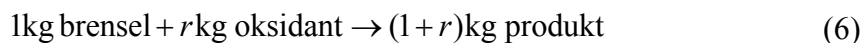
På neste side ser du Borghi-diagrammet for forblandede flammer. -Sett navn på delelinjene, a), b) og c) i diagrammet, og gi en kort beskrivelse av områdene i), ii), iii),

iv) og v). (Gitt: $Da = \frac{\theta}{\tau_c}$ og $Da_K = \frac{\tau}{\tau_c}$.)



Oppgave 5 – Blandingsfraksjon og konservert skalar

-Hvordan definerer vi en konservert skalar? Anta uendelig rask reaksjon i hele denne oppgaven. Gitt en enkel ett-steps reaksjon:



-Vis at $(Y_{br} - \frac{1}{r}Y_{oks})$ er en konservert skalar. Blandingsfraksjonen, ξ , for et blandingskammer med to innløpsstrømmer er definert som:

$$\xi = \frac{\varphi_{bl} - \varphi_2}{\varphi_1 - \varphi_2}, \quad 0 \leq \xi \leq 1, \quad (7)$$

hvor φ er en generell konservert skalar. Anta at innløp 1 bare inneholder brensel og innløp 2 bare oksidant. -Bruk opplysningene ovenfor til å finne et uttrykk for brensel massefraksjon som funksjon av blandingsfraksjonen, $Y_{br} = Y_{br}(\xi)$.

Oppgave 6 – Forbrenningsmodell med antatt sannsynlighetstetthet

Middelverdien for brensel massefraksjon er definert som:

$$\bar{Y}_{br} = \int_0^1 Y_{br}(\xi) f(\xi) d\xi. \quad (8)$$

I modell for antatt sannsynlighetstetthet er sannsynlighetstettheten for blandingsfraksjonen

$$f(\xi) = \frac{\xi^{a-1}(1-\xi)^{b-1}}{B(a,b)}, \quad (9)$$

der

$$B(a,b) = \int_0^1 x^{a-1}(1-x)^{b-1} dx. \quad (10)$$

Koeffisientene a og b er bestemt av

$$\bar{\xi} = \frac{a}{a+b} \quad \text{og} \quad \overline{\xi^2} = \frac{\bar{\xi}(1-\bar{\xi})}{1+a+b}. \quad (11)$$

For et gitt område i et brennkammer har vi at $\bar{\xi} = 0.5$ og $\overline{\xi^2} = 0.05$.

-Beregn sannsynlighetstettheten for blandingsfraksjonen, $f(\xi)$, i dette området.
 -Bruk uttrykket du har funnet for $f(\xi)$ samt $Y_{br}(\xi)$ fra oppgave 5 og sett opp det bestemte integralet du må løse for å finne \bar{Y}_{br} . (Det er ikke meningen at du skal regne ut integralet.)

Du skal løse et turbulent forbrenningsproblem med k - ϵ -modell og antatt sannsynlighetstetthet.

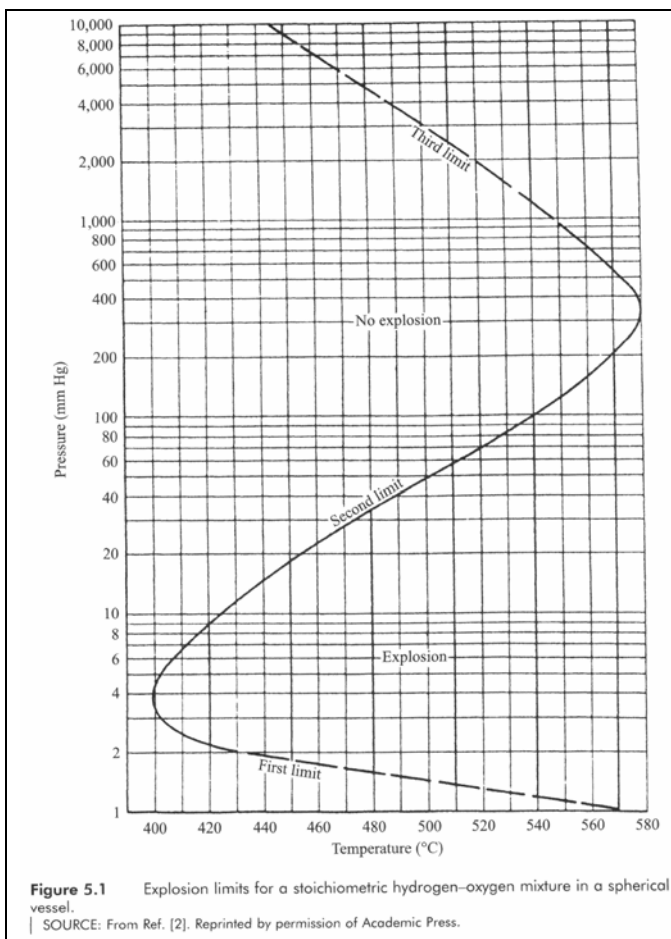
-Hvilke transportligninger må du løse? (Det er ikke nødvendig å skrive ut ligningene.)

Oppgave 7 – Kjemisk kinetikk

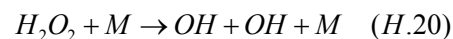
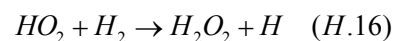
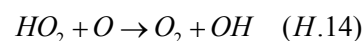
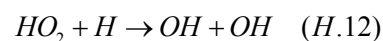
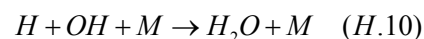
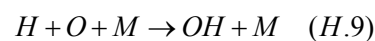
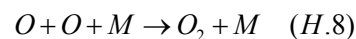
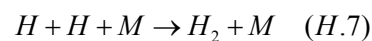
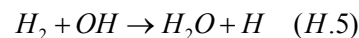
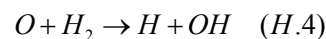
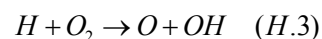
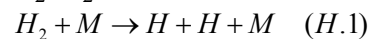
- Hva er en bimolekylær reaksjon?
- Definer likevektskonstanten basert på konsentrasjoner (K_C) for en bimolekylær reaksjon.
- Vis at likevektskonstanten basert på partialtrykk (K_p) er lik likevektskonstanten basert på konsentrasjoner for en bimolekylær reaksjon.
- Hvilken rolle kan likevekt ha ved beregninger med detaljert kjemisk kinetikk?

Oppgave 8 – Reaksjonsmekanismer

-Forklar eksplosjonskarakteristikken til H_2 - O_2 systemet, vist i følgende figur, ved 500 °C:



H₂-O₂ mekanismen:



Oppgave 9 – Forblanda laminære flammer

-Beregn, ved å gjøre visse begrunnede antagelser, den laminære flammehastigheten til en støkiometrisk propan-luft blanding gitt følgende:

$$S_L = \left(-2\alpha(\nu + 1) \frac{\bar{m}_F}{\rho_u} \right)^{1/2}$$

$$\dot{\omega}_F \equiv \frac{d[C_3H_8]}{dt} = -k_G [C_3H_8]^{0.1} [O_2]^{1.65}$$

$$k_G = 4.836 \cdot 10^9 \exp\left(\frac{-15098}{T}\right), \quad \left[\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}\right]^{-0.75} \frac{1}{\text{s}}$$

$$T_{ad} = 2260 \text{ K}$$

$$T_u = 300 \text{ K}$$

$$\alpha(1280 \text{ K}) = 5.89 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$R_u = 8315 \text{ J/kmolK}, \quad P = 101325 \text{ Pa}$$

Molvekter: C: 12, H: 1, O: 16, N: 14

Anta fullstendig forbrenning.

Oppgave 10 – Uforblanda laminære flammer

- Hvilke faktorer påvirker flammelengden til en vertikal jet uforblanda flamme, og hvorfor?
- Hvordan dannes sot?
- Skisser et typisk radielt temperaturprofil og sotkonsentrasjonsprofil i en vertikal jet hydrokarbon uforblanda flamme.

Oppgave 11 – Faste brensler

- Forklar d^2 loven, og betydningen av parametrene som inngår, gitt nedenfor:

$$d^2(t) = d_0^2 - K_B t$$

$$K_B = \frac{8\rho D}{\rho_c} \ln(1 + B)$$

- Sett opp uttrykket for partikkelens levetid.
- Beregn levetiden til en 70 μm diameter karbon partikkel med temperatur 1800 K ved å anta diffusjonskontrollert forbrenning i stillestående atmosfærisk luft. Anta karbon tettheten lik 1900 kg/m^3 , diffusjonskoeffisienten lik 0.000157 m^2/s (CO_2 i N_2 ved 1800 K) og $B=B_{\text{CO}_2,\text{m}}=0.1749$.

Oppgave 12 – Utslipp

- Hva er hensikten med utslippskonvertering?
- Ved støkiometrisk propan-luft forbrenning dannes det 100 ppm NO. -Konverter dette utslippet til ppm ved 15% O_2 . -Hva blir utslippet i gram NOx (som NO_2) per kg propan ved de to O_2 nivåene?