

NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET
INSTITUTT FOR ENERGI- OG PROSESSTEKNIKK

EKSAMEN I FAG TEP4170 VARME- OG FORBRENNINGSTEKNIKK
Lørdag 29. mai 2004 Tid: 09.00 – 13.00

Sensurfrist: 22.juni 2004

Tillatte hjelpemiddel:

D – Ingen trykte eller håndskrevne hjelpemiddel. Bestemt, enkel kalkulator tillatt.

Bruk helst ikke rød blyant/penn, det er forbeholdt sensuren.

Les gjennom oppgavene først. Start med den oppgaven du mener du har best innsikt i. Dersom det er mulig, la ikke noen oppgave være helt blank. Skriv klart, det lønner seg!

Oppgave 1

a)

— Forklar om turbulens ut fra disse stikkordene:

strømning, rom og tid, diffusiv, lengdeskalaer, energioverføring, forbrenning.

b)

Når tettheten regnes som konstant, kan den “eksakte” (ikke modellerte) likningen for turbulensenergien, k , skrives som

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k \bar{u}_j) &= -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\frac{1}{2} \overline{\rho u'_i u'_i u'_j} - \overline{p' u'_j} \right) - \mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}. \end{aligned} \quad (1)$$

— Vis hvordan likning (1) blir utledet.

(Du skal vise fremgangsmåten, dvs. du trenger ikke å vise alle detaljer for alle ledd.)

c)

— Gi en kort, fysikalsk tolkning av hvert ledd i den “eksakte” k -likningen (1).

— Hvilke ledd i likningen må modelleres, og hvordan blir dette gjort i k - ϵ -modellen (“standard”, konstant tetthet)?

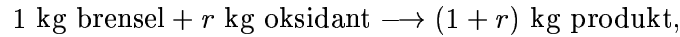
d)

— Forklar hva som menes med begrepene *homogen turbulens* og *isotrop turbulens*.

— Vis hvordan likning (1) kan forenkles for isotrop turbulens.

Oppgave 2

I et brennkammer er det to innløp. I innløp (1) tilføres brensel, og i innløp (2) tilføres oksidant. Forbrenningen i brennkammeret kan uttrykkes ved den enkle, ett-stegs forbrenningsreaksjonen



der r er støkiometrisk oksidantmengde.

a)

— Vis at funksjonen $(Y_{\text{br}} - \frac{1}{r}Y_{\text{oks}})$ kan betraktes som en konserverte skalar. (Y_i er massefraksjon av stoff i .)

b)

Propan (C_3H_8) tilføres i innløp (1), og luft tilføres i innløp (2).

(Molmasser; propan: 44, O_2 : 32, N_2 : 28, CO_2 : 44 og H_2O : 18.)

— Finn støkiometrisk luftmengde, r , på massebasis.

— Bruk den konserverte skalaren $(Y_{\text{br}} - \frac{1}{r}Y_{\text{oks}})$ til å definere en blandingsfraksjon ξ , og finn støkiometrisk blandingsfraksjon ξ_s .

— Hvilken nytte kan en ha av å løse en transportlikning for en blandingsfraksjon ξ ?

c)

Et eksempel på en “virvelmodell” for turbulent forbrenning er

$$\bar{R}_{\text{br}} = A \cdot \frac{\varepsilon}{k} \rho \cdot \min \left[\bar{Y}_{\text{br}}, \frac{1}{r} \bar{Y}_{\text{oks}}, B \cdot \frac{1}{1+r} \bar{Y}_{\text{pr}} \right].$$

— Beskriv størrelsene som modellen består av, og forklar kort om hovedprinsippene bak denne modellen.

d)

I forbindelse med forbrenning av flytende brensler gjennomgår dråpene tre ulike faser.

— Beskriv disse fasene.

e)

I et brennkammer som er 1 m langt, skal forstøvet n-heptan forbrennes med luft. Hastigheten på luft/brensel-blandingen er 50 m/s. Anta at diameteren til en brennende dråpe som funksjon av tiden, kan estimeres av en såkalt d^2 -lov uttrykt som

$$D^2 = D_0^2 - K t,$$

der forbrenningsraten K kan uttrykkes ved

$$K = a \cdot \ln(1 + B).$$

For n-heptan er $a = 5,86 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ og $B = 5,82$.

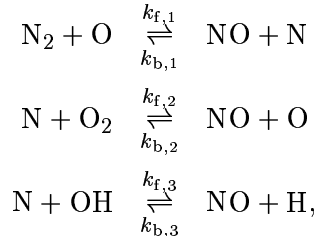
— Hva er den maksimale dråpestørrelsen som vil forbrenne i brennkammeret?

En vurderer å bruke iso-oktan istedenfor n-heptan i brennkammeret. For iso-oktan er $B = 6,41$, og vi antar at modellkonstanten a er som før, dvs. $a = 5,86 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

— Vil iso-oktan forstøvet til den samme maksimale dråpestørrelsen, kunne forbrennes fullstendig i brennkammeret? Begrunn svaret!

Oppgave 3

Dannelsen av termisk NO i et brennkammer skal studeres. Dannelsen antas å skje etter den utvidede Zeldovich-mekanismen



der

$$\begin{aligned} k_{\text{f},1} &= 1,8 \cdot 10^8 \cdot e^{-38370/T} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1} \\ k_{\text{b},1} &= 3,8 \cdot 10^7 \cdot e^{-425/T} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1} \\ k_{\text{f},2} &= 1,8 \cdot 10^4 T \cdot e^{-4680/T} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1} \\ k_{\text{b},2} &= 3,8 \cdot 10^3 T \cdot e^{-20820/T} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1} \\ k_{\text{f},3} &= 7,1 \cdot 10^7 \cdot e^{-450/T} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1} \\ k_{\text{b},3} &= 1,7 \cdot 10^8 \cdot e^{-24560/T} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}. \end{aligned}$$

a)

— Sett opp uttrykkene for $\frac{d[\text{N}]}{dt}$ og $\frac{d[\text{NO}]}{dt}$.

— Utpek den hastighetsbestemmende delreaksjonen i dannelsen av NO og forklar årsaken. (Notasjon: $[\text{NO}] = c_{\text{NO}}$ er stoffmengdekonsentrasjon, molkonsentrasjon.)

b)

Anta at N-atomer dannes og forbrukes like raskt i reaksjonsmekanismen ovenfor (dvs. anta “quasi-steady state” for N).

— Finn et uttrykk for molkonsentrasjonen $c_{\text{N}} = [\text{N}]$.

c)

Anta at O, O₂, H og OH er i likevektskonsentrasjoner.

— Vis at en karakteristisk tid, τ_{N} , for dannelsen av N-atomer kan uttrykkes som

$$\tau_{\text{N}} = \frac{1}{k_{\text{f},2} [\text{O}_2]^e + k_{\text{f},3} [\text{OH}]^e},$$

der $[\text{O}_2]^e$ og $[\text{OH}]^e$ er likevektskonsentrasjoner.

— Hvilket krav må vi stille til τ_{N} i forhold til den karakteristiske tiden for NO-dannelse, τ_{NO} , når antagelsen om “quasi-steady state” benyttes?