

NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET
INSTITUTT FOR ENERGI- OG PROSESSTEKNIKK

NOEN TIDLIGERE EKSAMENSOPPGAVER
I
VARME- OG FORBRENNINGSTEKNIKK

Oppgave 1

a)

I k - ε -modellen (“standard”, konstant tetthet) kan den modellerte k -likningen skrives som

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho P_k - \rho \varepsilon, \quad (1)$$

– Vis hvordan den “eksakte” (ikke modellerte) k -likningen kan utledes.
(Du skal vise fremgangsmåten, og trenger ikke vise alle detaljer i alle ledd.)

b)

– Hvilke ledd i den “eksakte” k -likningen må modelleres, og hvordan blir dette gjort?
– Hvordan blir ε -likningen modellert?

c)

I et område nær en plan vegg bruker vi tilnærmingen

$$\frac{d\bar{u}_1}{dx_2} = \frac{u_\tau}{\kappa x_2}, \quad (2)$$

– Vis hvordan vi finner en vegglov for dissipasjonen (dissipasjonsraten) ε . Forklar de forutsetningene du må gjøre i tillegg til likning (2).

d)

Vis og forklar hvordan en kommer fram til vegglovene

$$T^+ = \frac{1}{\kappa_T} \ln x_2^+ + D_T = \frac{1}{\kappa_T} \ln (E_T x_2^+), \quad (3)$$

der $T^+ = \rho C_p (T_w - \bar{T}) u_\tau / q_w$.

Opplysning: $\nu_t = \kappa u_\tau x_2$

Oppgave 2

a)

Flammefarten kan uttrykkes som $v_L = \sqrt{D/\tau}$, der $\tau = k^{-1} = [A \exp(\frac{-E}{RT})]^{-1}$.

I forblanda flammer:

- Hvordan kan flammefarten tolkes?
- Hvordan kan vi uttrykke og tolke en tilhørende lengdeskala?
- Hva med uforblanda flammer?

b)

For å definere ulike regimer for turbulente flammer kan vi bruke to dimensjonsløse grupper. De må være satt sammen av to turbulensskalaer og én kjemisk skala, i tillegg til stoffegenskaper.

- Velg et sett av slike skalaer som kan brukes (det finnes flere alternativ) og forklar hvordan disse skalaene er definerte og hva de representerer.

Svaret skal gis for både forblanda og uforblanda flammer.

Oppgave 3

a)

Det er gjort framlegg om ein ny turbulensmodell. For isotrop turbulens vert modellen forenkla til

$$\frac{dk}{dt} = -C_k \frac{k^{3/2}}{L} \quad (4)$$

$$\frac{dL}{dt} = C_L \sqrt{k} \quad (5)$$

der C_k og C_L er positive konstanter.

Målingar viser at k endrar seg med tida som $k \sim t^{-n}$ ($n > 0$).

- Korleis vil L endre seg med tida?
- Vurder om modellen er realistisk.

Gitt reknereglar: $x^{a+b} = x^a \cdot x^b$, $x^{ab} = (x^a)^b$.

b)

Likninga for middel-massefraksjon av eit stoff k kan skrivast:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{Y}_k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \bar{Y}_k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D \frac{\partial \bar{Y}_k}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_j Y'_k} \right) + \bar{R}_k$$

- Vis korleis vi kjem fram til denne likninga og forklar kva dei ulike ledda representerer.

c)

- Gjer greie for hovudpunkt i Flamelet-modellar.

Oppgave 4

a)

Vi har ein Bunsen-brennar med luftoverskot og kjend strøymingsfart v_u av uforbrent gass.

– Skisser flamma og forklar korleis du ved eit enkelt forsøk kan finne laminær flammefart.

b)

– Forklar om skilnadene mellom forblanda og uforblanda flammer (utforming, utsjånad, fysiske/kjemiske prosessar, analyse, m.m.).

c)

Vi har ei kjedereaksjonsmekanisme for danning av nitrogenoksid ved høg temperatur:



– Skriv opp uttrykka for $\frac{d[\text{NO}]}{dt}$ og $\frac{d[\text{N}]}{dt}$.

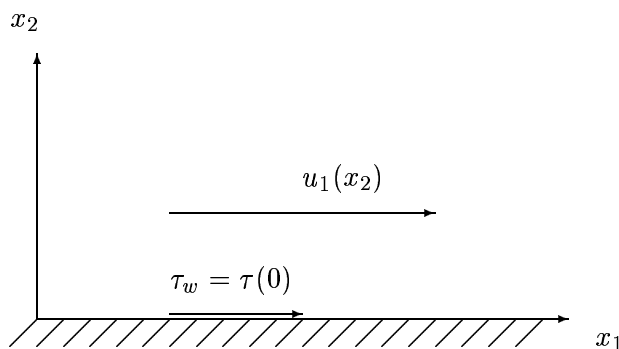
– Formuler kjeldeleddet R_{NO} i ei transportlikning for massefraksjon av NO.

(Notasjon: $[\text{NO}] = c_{\text{NO}}$ er stoffmengdkonsentrasjon, molkonsentrasjon).

Oppgave 5

I de fleste numeriske beregninger av turbulent strøyming langs faste flater blir det brukt vegglover. Vegglover baserer seg på kunnskap om hvordan grensesjikt utvikler seg nær veggen. Todimensjonal, midlet ligning for hastighetskomponenten langs veggen kan uttrykkes som:

$$\rho \bar{u}_1 \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_1} + \rho \bar{u}_2 \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_2} = -\frac{\partial \bar{P}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\rho \nu \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_2} - \overline{\rho u'_1 u'_2} \right) \quad (3)$$



a)

Eksperimentelle undersøkelser har vist at nær veggen (innenfor ca. 20 % av grensesjiktstykkelsen) er skjærspenningen $\tau \approx \tau_w$, hvor:

$$\tau = \rho\nu \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_2} - \overline{\rho u'_1 u'_2}$$

$$\tau_w = \rho\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_2} \right)_{x_2=0} \equiv \rho u_\tau^2$$

Innfør dimensjonsløse grupper:

$$u_1^+ = \frac{\bar{u}_1}{u_\tau} \quad \text{og} \quad x_2^+ = \frac{x_2 u_\tau}{\nu}$$

og basert på antagelsene ovenfor, utled for viskøst undersjikt ($-\overline{u'_1 u'_2} \rightarrow 0$ og $\tau \approx \rho\nu \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_2}$) funksjonssammenhengen:

$$u_1^+ = u_1^+(x_2^+)$$

b)

Når $\tau \approx \tau_w$ og $-\overline{\rho u'_1 u'_2} \neq 0$ ($\tau \approx -\overline{\rho u'_1 u'_2}$) gir dimensjonsanalyse at:

$$\frac{d\bar{u}_1}{dx_2} = \frac{u_\tau}{\kappa x_2} \quad (4)$$

hvor $\kappa = 0.4$

Bruk Prandtls blandingsveimodell:

$$\nu_t = \ell^2 \left| \frac{d\bar{u}_1}{dx_2} \right|$$

og finn uttrykk for ℓ i området hvor $\tau \approx \tau_w \approx -\overline{\rho u'_1 u'_2}$

c)

Integrerer vi opp ligning (4), får vi:

$$u_1^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(E x_2^+)$$

hvor E er en konstant.

I områder hvor dette uttrykket er gyldig vil også produksjon, P_k , og dissipasjon, ε , av turbulensenergi k , være i tilnærmet likevekt.

Hvordan kan vi uttrykke ε som funksjon av x_2 og u_τ når:

$$P_k = \nu_t \left(\frac{d\bar{u}_1}{dx_2} \right)^2$$

d)

I $k - \varepsilon$ modellen modelleres ν_t som:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad , \quad C_\mu = 0.09$$

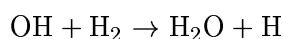
Finn sammenhengen mellom k og u_τ når produksjon og dissipasjon av turbulensenergi er i tilnærmet likevekt.

Oppgave 6

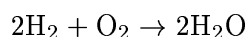
I laminære og turbulente flammer konverteres reaktanter til produkt gjennom kjemiske reaksjoner som i sum omgjør kjemisk bindingsenergi til termisk energi.

a)

Reaksjonen



kaller vi en elementær reaksjon, mens reaksjonen



blir kalt en 'overall' reaksjon eller global reaksjon.

Hva er forskjellen på de to typene reaksjoner ?

b)

Progresjonsloven ('rate law') for OH på basis av reaksjonen



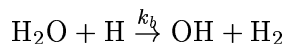
gir:

$$\frac{d[\text{OH}]}{dt} = -k_f[\text{OH}]^a[\text{H}_2]^b$$

Hva vil a og b være i dette tilfelle, og hvorfor ?

c)

Ved høye temperaturer vil bakoverreaksjonen for reaksjon (I):



være signifikant.

Vis hvordan bakover hastighetskoeffisient, k_b , kan uttrykkes ved hjelp av forover hastighetskoeffisient ('rate coefficient'), k_f , og likevektskonstanten, K_C .

d)

For temperaturer over 1800 K er det en god tilnærming å anvende partiell likevekt for følgende

reaksjoner:



hvor $k_{f,r}$ og $k_{b,r}$ er forover og bakover hastighetskoeffisient til reaksjon r . Vis hvordan H, O og OH kan uttrykkes som funksjoner av H_2 , O_2 og H_2O når vi bruker partiell likevekt for reaksjonene (II) til (IV).

Oppgave 7

For både flytende og faste brensler kan forbrenningstiden for en partikkel beregnes etter en d^2 -lov (d square law).

- Skisser diameterutviklingen ($d(t)$) i denne loven som funksjon av tid. Hvilke fysikalske størrelser inngår i loven, og hva er de viktigste parametrene?
- I faste brensler er det typisk tre ulike forbrenningsregimer. Skisser og forklar disse.
- Nevn og forklar prinsippene for ulike forstøvningsmetoder for flytende brensler.