NOREGS TEKNISK-NATURVITSKAPLEGE UNIVERSITET
INSTITUTT FOR MEKANIKK, TERMO- OG FLUIDDYNAMIKK

Kontakt under eksamen:
Ivar Ertesvåg, tel. 93839/Ole Melhus, 93662

EKSAMEN I FAG SIO1073
VARME- OG FORBRENNINGSTEKNIKK
Tysdag 22. mai 2001 Tid: 09.00 – 13.00

Planlagd sensur i veke 24

Oppgåveteksten finst også på bokmål og engelsk.

Tillatne hjelpemiddel: B1 – Typegodkjend kalkulator tillaten med tomt minne, i samsvar med liste utarbeidd av NTNU. Ingen trykte eller handskrivne hjelpemiddel.

Bruk helst ikkje raud blyant/penn, det er halde av for sensuren.

Les gjennom oppgåvene først. Start med den oppgåva du meiner du har best innsikt i. Dersom det er råd, lat ikkje noko oppgåve vere heilt blank. Skriv klart, det løner seg!

Oppgåve 1

a)
– Forklar om turbulens ut frå stikkorda
rørsle, rom og tid, diffusiv, lengdeskalaer, forbrenning

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

$$\frac{dk}{dt} = -C_k \frac{k^{3/2}}{L} \tag{1}$$

$$\frac{dL}{dt} = C_L \sqrt{k} \tag{2}$$

der C_k og C_L er positive konstantar.

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

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

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

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

d)
– Gjer greie for hovudpunkt i Flamelet-modellar.

Oppgåve 2

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:

$$\mathrm{O} + \mathrm{N_2} \xrightarrow{k_{1f}} \mathrm{NO} + \mathrm{N} \tag{1}$$

$$\mathrm{N} + \mathrm{O_2} \xrightarrow{k_{2f}} \mathrm{NO} + \mathrm{O} \tag{2}$$

– Skriv opp uttrykka for $\dfrac{d[\mathrm{NO}]}{dt}$ og $\dfrac{d[\mathrm{N}]}{dt}$.
– Formuler kjeldeleddet R_{NO} i ei transportlikning for massefraksjon av NO.

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

d)
Ein absorberande gass (absorberer termisk stråling) ligg mellom to store, parallelle plater 1 og 2, med overflatetemperaturar $T_1 = 1200\,\mathrm{K}$ og $T_2 = 800\,\mathrm{K}$, og emissivitetar $\varepsilon_1 = 0{,}8$ og $\varepsilon_2 = 0{,}7$. Gassen kan reknast som *grå* med emissivitet $\varepsilon_g = 0{,}4$. Stefan-Boltzmann-konstanten er $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{W/(m^2K^4)}$.
– Finn den termiske strålingsutvekslinga (varmeoverføringa) mellom platene.

Oppgåve 3

Her skal studentar frå studieprogram SIO3 (Produktutvikling og produksjon) gjere oppgåve 3.2 (ikkje 3.1), medan alle andre skal gjere 3.1 (ikkje 3.2).

3.1

Når ein reknar på fluiddynamiske problem er Navier-Stokes-likningane (rørsøemengde- eller impulslikningane), kontinuitets- og energilikninga sentrale differensiallikningar for å uttrykke problemet matematisk.

a. Korleis kan energilikninga omformast frå ei differensiallikning til ei *differanselikning* (diskretiserast)? Vis dette for eit éin-dimensjonalt, transient problem når du nyttar oppstraumsdifferensiering og ein eksplisitt (framlengs Euler) tidsintegrasjonsmetode. Her kan spesifikk varme C_p reknast konstant.

b. Forklar kort korleis dei algebraiske likningane som kom fram ved diskretiseringa av differensiallikninga for energi, kan løysast. Diskuter dei stabilitetskrava som gjeld for dette tilfellet.

c. Når, og kvifor, vert *underrelaksering* nytta, eventuelt *overrelaksering*, ved løysing av eit likningssystem? Vis prinsippet matematisk ved å ta utgangspunkt i likninga:

$$a_p \cdot T_p = \Sigma\, a_{nabo} \cdot T_{nabo} + b$$

d. Korleis vert statisk trykk rekna ut i eit strøymande fluid når SIMPLER-algoritmen vert nytta?

<u>3.2</u>

a)
I ein produksjonsprosess for is strøymer vatn med temperatur 5 °C over (langs) ei plate som på den andre sida vert kjølt av ei kjølevæske med temperatur -10 °C. Når islaget er 2 mm tjukt, vert isen skrapa av plata, og fryseprosessen gjort omatt.

– Skisser temperaturprofilet frå overflata av vatnet til kjølevæska. Kva forenklingar vil du nytte deg av for å løyse problemet gitt i neste spørsmål?
– Rekn ut tida som går mellom kvar skraping. Varmegjennomgangstalet frå kjølevæska til plate/is-flata er 900 W/(m^{2}K). Frysevarmen (smeltevarmen) for is ved 0 °C er 335 kJ/kg, tettleiken er 910 kg/m^3 og termisk konduktivitet er 2,22 W/(m · K).

b)
Vi observerer at den eine sideflata av ei isblokk neddukka i vatn smeltar med ei fart lik 0,22 mm/min. Vi reknar med at smelteprosessen har pågått ei tid.
– Rekn ut temperaturgradienten i vatnet ved den smeltande isflata. Frysevarmen (smeltevarmen) for is ved 0 °C er 335 kJ/kg, tettleiken er 910 kg/m^3, og for vatnet er termisk konduktivitet 0,552 W/(m · K).

c)
Basert på *Nusselt-føresetnaden* for *laminær film-kondensasjon* på ei vertikal flate, skal du forklare *kort* korleis ein kan rekne ut
– konvektiv varmeovergangskoeffisient
– kondensasjonsraten
– filmtjukkleiken

NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET
INSTITUTT FOR MEKANIKK, TERMO- OG FLUIDDYNAMIKK

Kontakt under eksamen:
Ivar Ertesvåg, tel. 93839/Ole Melhus, 93662

EKSAMEN I FAG SIO1073
VARME- OG FORBRENNINGSTEKNIKK
Tirsdag 22. mai 2001 Tid: 09.00 – 13.00

Planlagt sensur i uke 24

Oppgaveteksten finnes også på nynorsk og engelsk.

Tillatte hjelpemiddel: B1 – Typegodkjent kalkulator tillatt med tomt minne, i samsvar med liste utarbeidet av NTH. Ingen trykte eller handskrevne hjelpemiddel.

Bruk helst ikke rød blyant/penn, det er holdt av for sensuren.

Les gjennom oppgavene først. Start med den oppgava du meiner du har best innsikt i. Dersom det er råd, lat ikke noen oppgave være heilt blank. Skriv klart, det lønner seg!

Oppgave 1

a)
– Forklar om turbulens ut fra stikkorda
rørsle, rom og tid, diffusiv, lengdeskalaer, forbrenning

b)
Det er gjort framlegg om en ny turbulensmodell. For isotrop turbulens blir modellen forenkla til

$$\frac{dk}{dt} = -C_k \frac{k^{3/2}}{L} \tag{1}$$

$$\frac{dL}{dt} = C_L \sqrt{k} \tag{2}$$

der C_k og C_L er positive konstanter.

Målinger viser at k endrer seg med tida som $k \sim t^{-n}$ ($n > 0$).
– Hvordan vil L endre seg med tida?
– Vurder om modellen er realistisk.

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

c)
Likninga for middel-massefraksjon av et stoff k kan skrives:

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

– Vis hvordan vi kommer fram til denne likninga og forklar hva de ulike ledda representerer.

d)
– Gjør greie for hovedpunkt i Flamelet-modeller.

Oppgave 2

a)
Vi har en Bunsen-brenner med luftoverskott og kjent strømningsfart v_u av uforbrent gass.

– Skisser flamma og forklar hvordan du ved et enkelt forsøk kan finne laminær flammefart.

b)
– Forklar om skilnadene mellom forblanda og uforblanda flammer (utforming, utseende, fysiske/kjemiske prosesser, analyse, m.m.).

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

$$\mathrm{O} + \mathrm{N_2} \xrightarrow{k_{1f}} \mathrm{NO} + \mathrm{N} \tag{1}$$

$$\mathrm{N} + \mathrm{O_2} \xrightarrow{k_{2f}} \mathrm{NO} + \mathrm{O} \tag{2}$$

– Skriv opp uttrykka for $\dfrac{d[\mathrm{NO}]}{dt}$ og $\dfrac{d[\mathrm{N}]}{dt}$.
– Formuler kildeleddet R_{NO} i ei transportlikning for massefraksjon av NO.

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

d)
En absorberende gass (absorberer termisk stråling) befinner seg mellom to store, parallelle plater 1 og 2, med overflatetemperaturer $T_1 = 1200\,\mathrm{K}$ og $T_2 = 800\,\mathrm{K}$, og emissiviteter $\varepsilon_1 = 0{,}8$ og $\varepsilon_2 = 0{,}7$. Gassen kan antas å være *grå* med emissivitet $\varepsilon_g = 0{,}4$. Stefan-Boltzmanns konstant er $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{W/(m^2K^4)}$.
– Beregn den termiske strålingsutvekslingen (varmeoverføringen) mellom platene.

Oppgave 3

Her skal studenter fra studieprogram SIO3 (Produktutvikling og produksjon) gjøre oppgave 3.2 (ikke 3.1), mens alle andre skal gjøre 3.1 (ikke 3.2).

3.1

Ved beregning av fluiddynamiske problemer er Navier-Stokes ligninger (bevegelsesmengde- eller impulsligningene), kontinuitets- og energiligningen sentrale differensialligninger i forbindelse med den matematiske beskrivelse av problemet.

a. Hvordan kan energiligningen omformes fra en differensialligning til en *differanseligning* (diskretiseres)? Vis dette for et én-dimensjonalt, transient problem når du benytter oppstrømsdifferensiering og en eksplisitt (forlengs Euler) tidsintegrasjonsmetode. Anta at spesifikk varme C_p er konstant i beregningsområdet.

b. Gi en kort beskrivelse av hvordan de algebraiske ligninger som er fremkommet etter diskretisering av differensialligningen for energi, kan løses. Diskuter de stabilitetskrav som gjelder for dette tilfellet.

c. Når, og hvorfor, benyttes *underrelaksering*, eventuelt *overrelaksering*, ved løsning av et ligningssystem? Vis prinsippet matematisk ved å ta utgangspunkt i ligningen:

$$a_p \cdot T_p = \Sigma\, a_{nabo} \cdot T_{nabo} + b$$

d. Hvorledes beregnes statisk trykk i et strømmende fluid når SIMPLER-algoritmen benyttes?

<u>3.2</u>

a)
I en produksjonsprosess for is strømmer vann med temperatur 5 °C over (langs) en plate som på den andre siden blir kjølt av en kjølevæske med temperatur −10 °C. Når islaget er 2 mm tykt, blir isen skrapt av platen, og fryseprosessen gjentas.

– Skisser temperaturprofilet fra vannets overflate til kjølevæsken. Hvilke forenklinger vil du benytte deg av for å løse problemet gitt i neste spørsmål?
– Beregn tiden som går mellom hver skraping. Varmegjennomgangstallet fra kjølevæsken til plate/is flaten er 900 $\mathrm{W/(m^2K)}$. Frysevarmen (smeltevarmen) for is ved 0 °C er 335 kJ/kg, tettheten er 910 $\mathrm{kg/m^3}$ og termisk konduktivitet er 2,22 $\mathrm{W/(m \cdot K)}$.

b)
Man observerer at den ene sideflaten av en isblokk neddykket i vann smelter med en hastighet lik 0,22 mm/min. Anta at smelteprosessen har pågått en tid.
– Beregn temperaturgradienten i vannet ved den smeltende isflaten. Frysevarmen (smeltevarmen) for is ved 0 °C er 335 kJ/kg, tettheten er 910 $\mathrm{kg/m^3}$, og for vannet er termisk konduktivitet 0,552 $\mathrm{W/(m \cdot K)}$.

c)
Basert på *Nusselt-antagelsene* for *laminær film-kondensasjon* på en vertikal flate, skal du gi en *kort* beskrivelse av hvordan man kan beregne
– konvektiv varmeovergangskoeffisient
– kondensasjonsraten
– filmtykkelsen

NORWEGIAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF APPLIED MECHANICS, THERMODYNAMICS, AND FLUID DYNAMICS

Contact during examination:
Ivar S. Ertesvåg, tel. 93839/Ole Melhus, 93662

EXAM IN SUBJECT SIO1073 HEAT AND COMBUSTION TECHNOLOGY

Tuesday 22 May 2001 Time: 09.00 – 13.00

Result announcement planned in Week 24

The problems are also available in Norwegian (Nynorsk and Bokmål).

Permitted aids: B1 – Approved calculator permitted with empty memory, in accordance with list worked out by NTNU. No printed or handwritten aids.

Please do not use red pencil/pen, this is reserved for the censors.

Read through the problems first. Begin with the problem where you feel that you have the best insight. If possible, do not leave any problem blank. Formulate clearly, it pays off!

NOTE: Decimal sign is comma.

Problem 1

a)
– Explain about turbulence from the keywords
motion, space and time, diffusive, length scales, combustion

b)
A new turbulence model is proposed. For isotropic turbulence, the model simplifies to

$$\frac{dk}{dt} = -C_k \frac{k^{3/2}}{L} \tag{1}$$

$$\frac{dL}{dt} = C_L \sqrt{k} \tag{2}$$

where C_k and C_L are positive constants.

Measurements show that k changes with time as $k \sim t^{-n}$ ($n > 0$).
– How will L change with time?
– Evaluate whether the model is realistic.

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

c)
The equation for mean mass fraction of a species k can be written:

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

– Show how this equation is achieved and explain what the different terms represents.

d)
– Explain the main points of Flamelet-models.

Problem 2

a)
We have a Bunsen burner with excess air (fuel lean) and known flow velocity v_u of uburned gas.

– Sketch the flame and explain how you with a simple experiment can find the laminar flame speed.

b)
– Explain about the differences between premixed and non-premixed flames (design, appearance, physical/chemical processes, analysis, etc.)

c)
We have a chain reaction mechanism for formation of nitric oxide at high temperature:

$$\mathrm{O} + \mathrm{N_2} \xrightarrow{k_{1f}} \mathrm{NO} + \mathrm{N} \tag{1}$$

$$\mathrm{N} + \mathrm{O_2} \xrightarrow{k_{2f}} \mathrm{NO} + \mathrm{O} \tag{2}$$

– Write the expressions for $\dfrac{d[\mathrm{NO}]}{dt}$ and $\dfrac{d[\mathrm{N}]}{dt}$.
– Formulate the source term R_{NO} in a transport equation for mass fraction of NO.

(Notation: $[\mathrm{NO}] = \mathrm{c_{NO}}$ is the molar concentration, molar density).

d)
An absorbing gas (absorbing thermal radiation) is contained between two large parallel plates 1 and 2, with surface temperatures $T_1 = 1200\,\mathrm{K}$ and $T_2 = 800\,\mathrm{K}$, and emissivities $\varepsilon_1 = 0{,}8$ and $\varepsilon_2 = 0{,}7$. The gas is assumed to be *gray* with emissivity $\varepsilon_g = 0{,}4$. The Stefan-Boltzmann constant is $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{W/(m^2K^4)}$.
- Determine the radiation heat transfer between the two plates.

Problem 3

Here, students of study program SIO3 (Product development and production) have to do problem 3.2 (not 3.1), whereas all other have to do problem 3.1 (not 3.2).

3.1

When solving problems in fluid dynamics, Navier-Stokes (momentum) equations and the continuity and energy equations are important for the mathematical modelling of the problem.

a. Derive the discretization equation from the transient, 1-dimensional energy equation by use of the upwind differencing scheme and the explicit (forward) time scheme. The specific heat C_p is assumed constant.

b. Give a brief description of how you can solve the algebraic equations found after discretizing the energy equation.
   Discuss the stability criteria for this case.

c. When, and why, do we use *underrelaxation*, evt. *overrelaxation*, when solving a system of algebraic equations? Show the principple by using the following equation:

$$a_p \cdot T_p = \Sigma\, a_{neighbour} \cdot T_{neighbour} + b$$

d. How is the static pressure calculated in a fluid flow when the SIMPLER algorithm is used?

Problem 3.2

a)
In an ice-making process, water at 5 °C flows over a plate cooled by refrigerant at -10 °C. When the ice layer is 2 mm thick, it is scraped off the plate, and the process repeats itself.

– Make a sketch of the temperature profile from the water surface to the refrigerant. Which simplifying assumptions will you make to solve the problem given in the next question?
– Estimate the time interval required between scrapings. Take the overall heat transfer coefficient from the refrigerant to the plate-ice interface as $900\,\mathrm{W/(m^2K)}$. For ice, the enthalpy of fusion is 335 kJ/kg at 0 °C, the density is $910\,\mathrm{kg/m^3}$, and the thermal conductivity is $2{,}22\,\mathrm{W/(m \cdot K)}$

b)
One face of a block of ice submerged into water is observed to recede at a rate of 0,22 mm/min. The ice has been melting for some time.
– Calculate the temperature gradient in the water adjacent to the ice surface. The density and enthalpy of fusion of ice at 0 °C are $910\,\mathrm{kg/m^3}$ and 335 kJ/kg, respectively. The thermal conductivity for the water is $0{,}552\,\mathrm{W/(m \cdot K)}$.

c)
Based on the *Nusselt assumptions* for *laminar film condensation* on a vertical surface, give a *brief* description of how you can calculate
- the heat transfer coefficient
- the condensation rate
- the film thickness