

NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET
INSTITUTT FOR ENERGI- OG PROSESSTEKNIKK

Faglig kontakt under eksamen:
Institutt for energi- og prosesseteknikk, Gløshaugen

EKSAMEN I EMNE TEP4170 VARME- OG FORBRENNINGSTEKNIKK
Lørdag 4.juni 2005
Tid: 09.00 – 13.00

Sensuren faller 27.juni 2005.

Oppgaveteksten finnes også på engelsk.

Hjelpemidler:

D – Ingen trykte eller håndskrevne hjelpemidler tillatt. 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)

Likningen for middel-massefraksjonen av et stoff k kan skrives som:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{Y}_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \bar{Y}_k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D \frac{\partial \bar{Y}_k}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_j Y'_k} \right) + \bar{R}_k \quad (1)$$

— Vis hvordan vi kommer fram til likning (1).

— Forklar hva de ulike leddene i likning (1) representerer.

c)

I et todimensjonalt grensesjikt ved en vegg opptrer korrelasjonen $-\overline{u'_2 Y'_k}$, der Y_k er massefraksjon av et stoff k.

— Vis hvordan korrelasjonen $-\overline{u'_2 Y'_k}$ kan modelleres ved hjelp av en gradienttransportmodell.

— Hvordan blir den modellerte versjonen av $-\overline{u'_2 Y'_k}$ dersom Prandtls blandingsveiteori benyttes for modellering av hastighetsfeltet?

Oppgave 2

a)

— Ta utgangspunkt i Kolmogorovs hypoteser og finn et uttrykk for energispekteret i “tregt område” (eng: “inertial subrange”). Anta stasjonære forhold.

b)

— Forklar betydningen av Kolmogorovs mikroskalaer (ν og η) og vis hvordan en finner uttrykk disse.

c)

Luft strømmer turbulent i et rør med diameter 0,5 m. Den midlere hastigheten i senter av røret er 20 m/s, og turbulensintensiteten er 0,03. Kinematisk viskositet for luften kan settes lik $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Anta passende verdier på nødvendige størrelser og estimer følgende størrelser i senter av røret:

- Dissipasjonen ϵ
- Kolmogorovs mikroskala
- Reynoldstall for storskalaturbulensen
- Turbulensviskositeten
- Nødvendig frekvensoppløsning for måleutstyr som skal benyttes til å måle turbulensparametre

Oppgave 3

a)

Beskriv de tre viktigste dannelsmekanismene for NO fra N_2 i luft, med spesiell fokus på kjemien og hvordan denne påvirkes av temperatur, trykk, oppholdstid og flammetype.

b)

— Vis at Zeldovich-mekanismen for dannelselse av termisk NO kan reduseres til uttrykket

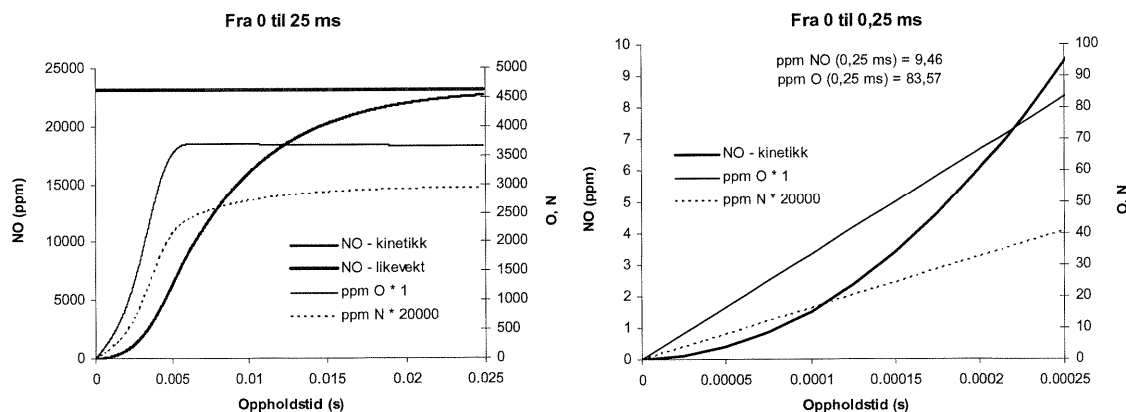
$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2k_{1f}[\text{N}_2][\text{O}] \quad (2)$$

der k_{1f} er reaksjonskonstanten i den ratebestemmende reaksjonen.
Hvilke antagelser må da gjøres?

c)

I luft ved en temperatur på 2500 K og et trykk på 3 atm vil det dannes termisk NO. En beregning med detaljert kjemisk kinetikk har blitt foretatt for å beregne konsentrasjonen av NO som funksjon av oppholdstid ved 2500 K og 3 atm.

Resultater fra beregningen er gitt i figuren nedenfor (andelen NO_2 og N_2O er neglisjerbar).



— Bruk likning (2) og $k_{1f} = 1,82 \cdot 10^{14} \exp\left(\frac{-38370}{T}\right) [\text{cm}^3/(\text{mol}\cdot\text{s})]$, anta likevekt mellom O_2 og O , og beregn NO -konsentrasjonen i ppm etter en oppholdstid på 0,25 ms.

— Hvor godt stemmer ditt resultat med resultatet fra beregningen med detaljert kjemisk kinetikk? Diskuter mulige årsaker til det avviket du fant, med fokus på de antagelsene som ble gjort i din forenklete løsningsmetode.

— Er likevektsantagelser i forbindelse med modellering av NO -utslipp fra forbrenningsprosesser å anbefale?

Noen termodynamiske data for O og O_2 :

$$\left[\bar{g}_{f,\text{O}}^0\right]_{T=2500\text{ K}} = 88203 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{g}_{f,\text{O}_2}^0(T) = 0 \text{ kJ/kmol}$$

Oppgave 4

a)

Følsomhetsanalyser og reaksjonsveianalyser kan benyttes til å analysere reaksjonsmekanismer.

— Forklar prinsippene bak disse metodene og diskuter hva de kan brukes til.

b)

— Hva er sot?

— Hvordan dannes sot?

c)

Forbrenning av faste brenslere foregår sekvensielt.

— Beskriv forbrenningsforløpet til en liten partikkel.

— Vil forbrenningsforløpet til en vedkubbe være det samme som for en liten partikkel?

NORWEGIAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF ENERGY AND PROCESS ENGINEERING

Contact during examination:
Department of Energy and Process Engineering, Gløshaugen

EXAM IN SUBJECT TEP4170 HEAT AND COMBUSTION TECHNOLOGY
Saturday 4 June 2005 Time: 09.00 – 13.00

Examination results are published: 27 June 2005.

This exam is also available in Norwegian.

Permitted aids:

D – No printed or handwritten aids. Approved calculator.

Please do not use a 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!

Problem 1

a)

— Explain about turbulence from the key words:
flow, space and time, diffusive, length scales, energy transfer, combustion.

b)

The equation for the mean mass fraction of species k can be written as:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{Y}_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \bar{Y}_k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D \frac{\partial \bar{Y}_k}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_j Y'_k} \right) + \bar{R}_k \quad (1)$$

— Show how equation (1) is derived.

— What do the various terms in equation (1) represent?

c)

In a two-dimensional wall boundary layer the correlation $-\overline{u'_2 Y'_k}$ appears, where Y_k is the mass fraction of species k.

— Show how the correlation $-\overline{u'_2 Y'_k}$ can be modelled by assuming a gradient-transport model.

— How will the modelled version of $-\overline{u'_2 Y'_k}$ become if Prandtl's mixing-length theory is used to model the velocity field?

Problem 2

a)

— Based on Kolmogorov's hypotheses, develop an expression for the energy spectrum in the "inertial subrange". Assume stationary conditions.

b)

— What do Kolmogorov's micro scales (ν og η) represent?
— Show how the expressions for these micro scales can be derived.

c)

A turbulent flow of air in a pipe with a diameter of 0.5 m will be studied. The average velocity in the centre of the pipe is 20 m/s, and the turbulence intensity is 0.03. The kinematic viscosity for the air is $\nu = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$.

Assume appropriate values for necessary quantities and estimate the following quantities in the centre of the pipe:

- the dissipation ϵ
- Kolmogorov's micro scale
- the Reynolds number for the large-scale turbulence
- the turbulence viscosity
- the necessary frequency resolution for equipment used to measure turbulence parameters.

Problem 3

a)

— Describe the three most important NO formation mechanisms for NO formation from N_2 in air, with special focus on the chemistry involved, and how this is influenced by temperature, pressure, residence time, and flame type.

b)

— Show that the Zeldovich mechanism for formation of thermal NO can be reduced to:

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2k_{1f}[\text{N}_2][\text{O}] \quad (2)$$

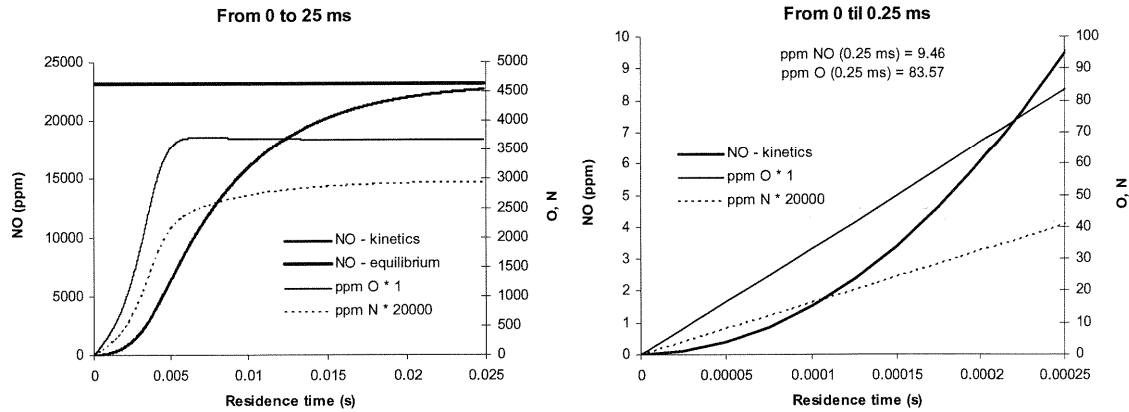
where k_{1f} is the reaction constant in the rate limiting reaction.

Which assumptions do you need to make?

c)

In air at a temperature of 2500 K and a pressure of 3 atm thermal NO will be formed. A calculation with detailed chemical kinetics has been performed to calculate the concentration of NO as a function of residence time at 2500 K and 3 atm.

Results from the calculation are given in the figure below (the amount of NO_2 and N_2O formed is negligible).



- Use equation (2) and $k_{1f} = 1.82 \cdot 10^{14} \exp\left(\frac{-38370}{T}\right) [\text{cm}^3/(\text{mol}\cdot\text{s})]$, assume equilibrium between O_2 and O , and calculate the NO concentration in ppm after a residence time of 0.25 ms.
- How well does your result agree with the result from the calculation with detailed chemical kinetics? Discuss possible reasons for the discrepancy you found, with focus on the assumptions you made in your simplified solution approach.
- Are equilibrium assumptions in connection with modelling of NO emissions from combustion applications to be recommended?

Thermodynamic data for O and O_2 :

$$\left[\bar{g}_{f,\text{O}}^0\right]_{T=2500\text{ K}} = 88203 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{g}_{f,\text{O}_2}^0(T) = 0 \text{ kJ/kmol}$$

Problem 4

- a) Sensitivity analyses and reaction path analyses can be used to analyse reaction mechanisms.
 - Explain the principles of these methods and discuss what they can be used for.
- b)
 - What is soot?
 - How is soot formed?
- c) Combustion of solid fuels is a sequential process.
 - Describe this sequential process for a small particle.
 - Will the sequential process for a wood log be different compared to the small particle?