

Kapittel 1

Grunnlag og innleiing

1.1 Siktemål, bakgrunn, oversyn

Bøker skal helst innleiest med nokre ord om tildrivet for å skrive, og – ikkje minst – for å lese boka. Alle bøker er viktige – for skrivaren. Berre sjeldan er dei unnnverlege og umissande for lesaren. Dette gjeld nok for denne boka også.

Forbrenning er viktig for oss. Rikeleg tilgang på rimeleg energi har vore ein av føresetnadene for den samfunnsutviklinga vi har hatt i vår del av verda, med sosial og teknologisk utvikling, velferd og velstand for mange. Nyttbar energi kjem hovudsakleg frå forbrenning. Den andre sida er baksida: Forbrenning er opphav til eller medverkar til alvorlege miljøproblem som luftforureining, skogøyding og klimaendring. Dette skadar helse, økonomi og økologi, og legg band på komande slekter. Brann, ukontrollert forbrenning, skal ikkje skje, men skjer likevel – eit tryggingsproblem og eit økonomisk problem.

Forbrenning inneber at gassar strøymer, somtid også væsker. Slik strøyming er ofte, om ikkje alltid, turbulent. I mange tilfelle utan forbrenning er strøyming viktig i seg sjølv. Naturlege straumar som vind, elvar og havstraumar er turbulente. Det same gjeld straumen i hovudblodårane, ventilasjonslufta i bygningar, fylling av støypeformer og drikkekartongar, kjølvatnet etter ein båt, og – kort sagt – dei fleste andre strøymingar.

Men rett skal vere rett: Forbrenningsutstyr og andre strøymingsinnretningar er stort sett konstruert av folk som ikkje har lest bøker som denne – og utstyret verkar. Nokon vil seie at ei så vellukka produktutvikling viser at slik teoretisk kunnskap er mest for særleg interesserte akademikarar. Andre vil sjå på den same utviklinga og seie at den ineffektive og forureinande energiomsetnaden vi driv med i dag, krev ein sterk innsats for å odle fram og plante ut grunnleggjande kunnskap.

Målgruppe for boka: Studentar, forskarar og ingeniørar (ingen er utlærd) som skal lære om og arbeide med turbulente strøymingar med og utan kjemiske reaksjonar.

Bakgrunn for boka, I: Nesten alle tekniske og naturlege strøymingar er turbulente. Dei verkar inn på tekniske innretningar, miljø, tryggleik og økonomi. Ein svært stor del av luftforureininga kjem frå forbrenning. Forbrenningsprosessar dominerer energiforsyninga, og med det velstand og velferd – og med verknader for miljø og framtidsvoner.

Bakgrunn for boka, II: Mange har teke i bruk dataprogram for å rekne detaljert på ulike strøymingar, med eller utan forbrenning. Etter kvart har det kome mange slike program, som med gilde og brukarvennlege grensesnitt og kraftige datamaskiner vert gode hjelpemiddel for ingeniøren.

Men ei lekkje er ikkje sterkare enn det veikaste leddet. Utan godt innsyn i fysikken og god kjennskap til dei matematiske modellane ein nyttar, kan det gå retteleg ille når resultatata skal setjast ut i livet.



Figur 1.1: Døme på strøyming med godt synleg turbulens. I røykskya kan vi sjå kvervlar som er om lag så store som pipeutløpet. Buktinga i sjølve røykskya kjem av kvervlar i vindstrømmen.

Siktemål

Denne boka er skriva for å fylla eit ledig rom innimellom dei bøkene som alt finst. Turbulensbøker er mest om tilnærma isoterm strøyming utan forbrenning. Forbrenningsbøker er ofte først og fremst

Bakgrunn for boka, III: Den tradisjonelle analysemetoden for termodynamiske system er å setje opp balansar for masse og energi, kanskje også rørslemengd og entropi, for store systemdelar. Desse balansane har ein løyst meir og mindre analytisk for hand, eller med enkle numeriske metodar. No kan dette gjerast med mykje finare oppdeling. Temperatur, konsentrasjonar og fart varierer innafør kvar systemdel – og desse variasjonane er viktige. I prinsippet brukar vi dei same balanselikningane – men handsaminga vert annleis.

om kjemiske reaksjonar og har lite eller inkje om strøyming. Kvar på sitt felt er dei utfyllande og gode om analyse, men seier lite om praktisk bruk av modellar. Bøker om numerisk strøymingslære gjev metodar for å løyse likningar, men seier lite om korleis sjølve likningane kjem fram og skal tolkast. Det finst mange bøker om særlege tekniske innretningar eller emne; som fyrkjelar, motorar, gassturbinar, flyvengar, vifter, ventilasjon, brann, havstraumar, atmosfæriske fenomen eller røyrrøyming. Slike bøker formidlar detaljkunnskap og oppsamla røynsle om det eine området, men har lite rom for å sjå på samanhengar til heilt andre område eller på den generelle teorien som ligg bak og som er sams for alle slike ting.

I denne boka har eg freista å drage saman kunnskap både om strøyming og om forbrenning, og å setje det inn i ein samla heilskap. Det skal vere ei hjelp for lesaren til å skjønne meir av dei fysiske fenomen, modellane og likningane. Då vil han betre kunne vurdere ulike prosessar, eller dei numeriske resultatata som nær sagt kven som helst er i stand til å produsere frå eit innkjøpt program. Det har også vore eit mål å hente kunnskapen ut frå akademiske sirklar – med tilhøyrande språkbruk – og leggje det fram i ei form som er meir tilgjengeleg for dei som har nytte av det.

Boka skal leggje eit fagleg grunnlag i turbulent strøyming med og utan forbrenning. Dette skal ein kunne byggje vidare på i prosjekt- og hovudoppgåve, i doktorarbeid eller anna forskingsarbeid, og i industri og forvaltning.

Kurset freistar å gje innsikt og forståing i grunnleggjande fysiske fenomen som påverkar miljø, tryggleik og økonomi. Forståing for desse prosessane gjev også større forståing for andre fenomen. Dei fleste strøymingar er turbulente slik at dette er aktuelt for alle som har å gjere med gass eller væske i rørsle. Kunnskap på dette fagområdet gjev grunnlag for konstruksjon («design») av utstyr og prosessar. Det gjev betre forståing for andre sine prosessar og problem. Det er viktig både for den som skal utføre arbeidet, for den som skal vere samarbeidspartner og for den som skal kontrollere.

Somme lesarar kjem av ulike grunnar ikkje til å arbeide vidare med turbulens og forbrenning. For desse vil kurset gje innsyn i fysiske fenomen, problemstillingar, terminologi, og anna som gjer det mogeleg å kommunisere og samarbeide med fagfolk på området.

Emnet: Dei aller fleste strøymingar er turbulente. Turbulens er mange små og store kvervelrørsler i strøyminga. Desse rørslele verkar til å blande ulike kjemiske stoff, jamne ut temperaturskilnader og endre kreftene som verkar i strøyminga. Forbrenning, varmetransport og spreing av stoff er i stort mon styrt av turbulensen i strøyminga. I denne boka skal vi sjå nærare på turbulent strøyming og forbrenning som fysisk/kjemisk fenomen. Vi skal også sjå på korleis slike strøymingar kan handterast og analyserast i ein teknisk samanheng.

Kort sagt handlar faget om underliggjande fysiske prosessar som dei fleste får å gjere med.

Målgruppe

Eg ser føre meg ei fire-delt målgruppe for denne boka: 1) Studentar, forskarar og ingeniørar som tek eit fag som del av ei grad eller som vidareutdanning og fagleg utvikling. 2) Ingeniørar/forskarar som arbeider med dette fagområdet og brukar dei modellane og teoriene som er drøfta her. Krysstilvisingar og stikkordliste gjer det lettare å bruke boka til støtte- og oppslagsbok. 3) Ingeniørar/forskarar på *andre* fagfelt som skal samarbeide med dei under 2). 4) Oppdragsgjeverar for 2), 3) og eventuelt 1). Inndelinga er ikkje absolutt, og dei fleste lesarane vil over tid kome innom to eller fleire av gruppene.

Hovudmålgruppa er dei som skal arbeide med dette eller nærskylde fagområde. Denne boka tek føre seg det sentrale området i nesten all prosessteknikk: Samspelet mellom rørsler og krefter, kjemiske reaksjonar, varme og termodynamiske eigenskapar. Med denne utrustninga skal du vere godt budd til ta i bruk meir spesialretta kunnskapar og løyse dei konkrete problema du kjem til å arbeide med i framtida.

Innafor eit prosjekt eller oppdrag vert det ofte ikkje rom for å gje ei utførleg utgreiing om teori og modellar som er nytta. Både i prosjekttilbodet og i rapporten skal det stå noko om korleis ein har tenkt å gjere/har gjort arbeidet. Det vert gjerne ein kortversjon i eit «stammespråk» som ikkje er lettfatteleg for utanforståande.

Nemningar som modell, simulering, $k-\varepsilon$, reynoldsspenning, Eddy Dissipation Concept, Flamelet, og så bortetter, vert lett inkjvetta merkelappar for dei som har virket sitt litt på sida av fagfeltet. Med noko innsats skal ein gjennom denne boka kunne skaffe seg meir innsyn i kva oppdragstakarane eigentleg har sysla med. Også for oppdragsgjeveren vert utbyttet større når han meir veit kva det er snakk om.

Det er naturlegvis ein baktanke frå forfattaren at dette vil tvinge ingeniørar og forskarar til å lese boka nøye. Elles kan dei risikere at oppdragsgjeveren veit meir om faget enn dei sjølve, som skal vere ekspertane.

Modellane er ofte ferdig innlagde (av nokon annan) i eit større rekneprogram. Brukaren av programmet må naturlegvis ha god kjennskap til teoriar og metodar. Det er meininga at denne boka skal kunne leggje eit godt grunnlag for dette.

Føremålet med boka:

Formidle kunnskap, innsyn og forståing om

- turbulent strøyming og forbrenning som fysiske fenomen,
- metodar for å analysere slike fenomen,
- grunnlaget for og utforminga av dei modellane som ligg i rekneprogram mange brukar.

Boka freistar å slå bru mellom teknikk og teori ved at grunnleggjande teoretisk kunnskap vert brukt i metodar for å løyse praktiske problem.

Fagleg underlag og samanheng

Denne boka må ein sjå i samanheng med andre bøker og fag, først og fremst numerisk masse- og varmetransport og forbrenningslære. Framstillinga her føreset ein viss grunnleggjande kunnskap i fluidmekanikk og termodynamikk, medrekna kjemiske reaksjonar. Det finst fleire titals bøker som dekkjer dette grunnlaget. I undervisninga ved NTH/NTNU har vi dei siste åra nytta Moran og Shapiro (1993,1998) eller Sonntag og VanWylen (1982,1991) i *Teknisk termodynamikk*, Mills (1995), Bejan (1993) eller Incropera og DeWitt (1990) i *Masse- og varmetransport*, og White (1986,1994) i *Teknisk strøymingslære*. Men, som sagt, det finst mange bøker i desse emna.

Minstekrav for naudsynt bakgrunn er vanskeleg å spesifisere. Like vanskeleg er det å lage ei liste over «nyttige» forkunnskapar. Særleg god innsikt på eitt felt kan kompensere for skort på andre felt; og eit godt vit, innsatsvilje og arbeidslyst kan bøte for mange hol.

Det viktigaste underlaget frå strøymingslære og masse- og varmetransport er

- likningane for masse (kontinuitet), rørslemengd (impuls, massefart), og energi på differensialform og på integralform (kontrollvolum); utleiing, tolking og forståing,
- viskøs strøyming og grensesjikt,
- konduktiv/diffusiv transport; gradientmodellar, Fouriers lov, Ficks lov.

Frå termodynamikk er kjemiske reaksjonar/forbrenning eit viktig emne.

Evetuelle manglar kan oppvegast med annan sakssvarande kunnskap – anten teoretisk eller praktisk – eller med meir idig lesnad undervegs.

Ein må også sjå boka i samanheng med bøker i nærliggjande emne. Ei forbrenningslære, t.d. Warnatz, Maas og Dibble (1996, 1999), kjem nærare inn på detaljane i forbrenningskjemien. Ei bok om numerisk fluiddynamikk, t.d. Versteeg og Malalasekera (1995), tek føre seg metodar for å løyse dei likningane som kjem fram i denne boka. Eit tredje emne er eksperimentalteknikk. Ei bok om dette er Doebelin (1990).

Boka er bygt opp kring forskingsverksemda i gruppa rundt Bjørn F. Magnussen ved NTNU/Sintef Energiforskning, og utvalet av stoff er prega av dette. I eit par tiår har dette fagmiljøet arbeidd med å modellere og simulere (etterlikne) turbulente strøymingar ved hjelp av datamaskiner. Gruppa har ein særleg stor aktivitet omkring forbrenningsproblem og Magnussens forbrenningsmodell (EDC). Vi arbeider også med strøymingar inne i og omkring byggverk og andre tekniske innretningar og spreing av stoff og varme i atmosfæren. Til dette har vi hovudsakleg nytta ein «standard» k - ϵ -modell for å gje eit bilete av turbulensen.

I mange høve gjer k - ϵ -modellen fullnøyande greie for turbulensen; i andre tilfelle løyser vi modelllikningane for reynoldsspenningane. (Der kom «stammespråket» igjen – du får lese meir og sjå kva glosene tyder.) Modellane for andre fysiske fenomen som reaksjonsrate, stråling, sotdanning

Samanheng og underlag:

Turbulent strøyming og forbrenning er vevd saman med andre emne som numeriske og eksperimentelle metodar, matematikk og kjemisk kinetikk. Vi byggjer på grunnleggjande kunnskapar frå varme og strøymingslære, frå matematikk, fysikk og kjemi, og fører dette fram til å løyse praktiske problem.

og varmeoverføring, kan vere meir uvisse. Men i nokre tilfelle ønskjer ein også å nytte ein betre turbulensmodell. Det kan vere at turbulensen er svak (lågt reynoldstal), at retningsavhengige kjeldeledd er viktige, eller at ein turbulensviskositet ikkje er god nok for retningsavhengige transport-eigenskapar. Når ein brukar ein modell, er det også viktig å ha kunnskap om bakgrunn og føresetnader for modellen. Og dess meir kompleks modell, dess meir forkunnskap krevst det.

Oversyn over boka

Dei to første kapitla inneheld innleiing til faget, litt grunnleggjande stoff og ymse ting det er greitt å ta med seg. Vi skal sjå på kva turbulens er, kva modellering er og litt om transport og blanding i turbulens. Noko av kapitlet skal gje praktisk kunnskap som er til nytte i faget, til dømes skrivemåten for likningar, midlingsreglar og kjemiske reaksjonar. Andre delar av kapitla freistar å formidle forståing (eller om ein vil, filosofi) for handsaming av turbulens og forbrenning, kvifor ein gjer slik ein gjer og kva ein kan vente seg. Noko vil vere lettare å skjønne etter at ein har gått igjennom stoffet lenger utover i boka.

I kapittel 3 skal vi utleie ei likning for turbulensenergi og etter kvart kome fram til den såkalla k - ε -modellen. Dette er ein mykje brukt turbulensmodell i forskning og industri. I kapittel 4 ser vi på enkle turbulente strøymingar. Desse vert dels nytta for å teste modellar, dels for å sjå på ymse fenomen i turbulensen. For ei grensesjikt-strøyming kan vi utleie enkle modellar, vegglover, som vert nytta som grensevilkår mot faste flater.

I kapittel 5 ser vi på modellering av energi- og massetransport. Vi ser på transportlikningar for skalare variable som energi og konsentrasjon. I likningane må turbulensdiffusjon og eventuelt kjeldeledd modellerast. Vi ser på konserverte skalarar og definerer blandingsfraksjonen.

Kapittel 6 tek føre seg ei gruppe meir avanserte, og vonleg meir generelle, modellar for turbulens: Modellar der ein løyser likningar for turbulensspanningane. Dette er modellar som er ein del nytta i forskning, og som også er på veg inn i industrien.

I kapittel 7 går vi igjennom litt om statistiske funksjonar og korleis dei vert nytta i turbulens.

I kapittel 8 går vi inn på spekteret av lengde- og tidsskalaer i turbulensen. Vi ser på nedbryting av turbulens til mindre og mindre kvervlar. Dette er viktig i forbrenningsproblem fordi transporten skjer mest ved store turbulensskalaer, medan dei minste skalaene er viktigast for den molekylære blandinga og med det for reaksjonen.

Kapittel 9 er ei samling likt og ulikt. Noko er oppsummering av ting frå fleire av kapitla framanfor. Dessutan skal vi sjå på ulike metodar for modellering av turbulens, og på korleis vi kan gjere enkle overslag for turbulent strøyming og forbrenning.

Kapittel 10 tek føre seg ein del ulike modellar for turbulent forbrenning. Og i kapittel 11 skal vi sjå meir detaljert på Magnussens forbrenningsmodell («Eddy Dissipation Concept», EDC). I dette kapitlet er det for første gong gjeve ei fullstendig utleiing og forklaring til modelluttrykka i EDC.

Tillegget er ei opplisting av likningar, uttrykk og definisjonar vi brukar i dette faget. Tillegg A inneheld grunnlikningane og definisjonar av ein del fysiske storleikar. Eg har freista å gjere dette så noggrant som råd, slik at alle ledd og alle føresetnader kjem med. Du skal kunne avleie dei nøyaktige likningane som gjeld for dei tenkjelege og (førebels) utenkjelege særtilfella du måtte finne på å