

# De danske kraftværkers omstilling fra kul til biomasse

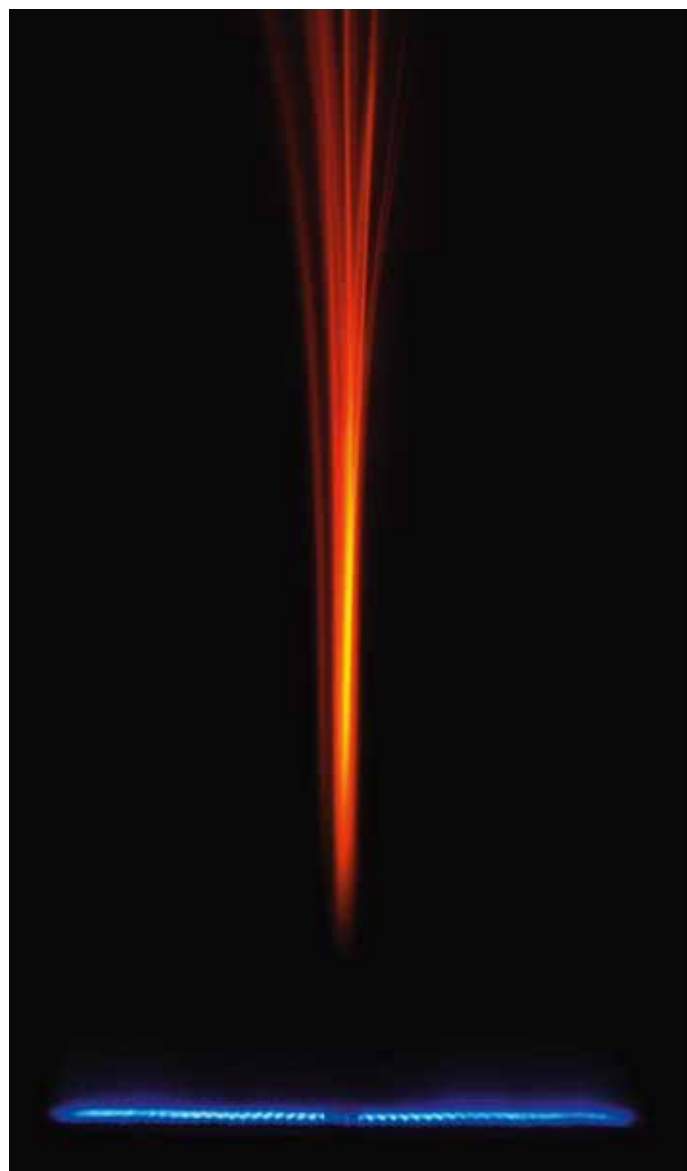
Det er målet at sikre en energi- og kosteffektiv omstilling frem mod fuldstændig udfasning af kul på de danske kraftvarmeværker i 2030. For at støtte denne omstilling er der gennemført et ph.d.-projekt, som har fokuseret på modellering af biostøvflammer.

Af Joakim M. Johansen, Peter A. Jensen og Peter Glarborg, DTU Kemiteknik

Den forøgede anvendelse af biomasse på centrale danske kraftværker giver en række udfordringer med hensyn til håndtering af biomassen, forbrændingen i kedlerne, ændrede egenskaber af brændselsasken og ændrede forhold for røggasrensingsanlæg. På Institut for Kemiteknik på DTU har der i samarbejde med Dong Energy, Vattenfall og Burmeister & Wain Energy været gennemført en række ph.d.-projekter, der har givet viden om forskellige aspekter af biomasseforbrænding på store pulverfyrede kraftværkskedler. Et af disse ph.d.-projekter har fokuseret på at forbedre delmodeller, der beskriver biomassepartiklers forbrænding. Denne slags delmodeller er nødvendige for at kunne udføre numerisk strømningsdynamik-simuleringer (CFD) af biomasseflammer for dermed at kunne forudsige flammernes flowmønstre, stabilitetsforhold, samt udbrænding og emissionsdannelse.

En stor del af biomassepartiklerne omdannes under pyrolysen, hvor partiklen afgiver brændbare gasser i en ren termisk reaktion. Der er blevet udviklet forbedrede modeller til den matematiske beskrivelse af denne pyrolyse. Modellerne kan implementeres direkte i kommercielle CFD-solvere uden yderligere at belaste kravene til computerkraft. Dermed opnås en forbedret flammemodellering.

Energiaftalen fra 2011 sigter mod fuldstændig udfasning af kul på de danske kraftvarmeværker i 2030 [1]. Selvom opførslen af nye vindmølleparker og kursen på Vestas-aktier optager mest spalteplads i dagsmedierne, er det stadigvæk de termiske værker, der udgør ryggraden i den danske el-produktion. Specielt sikrer de centrale el-værksenheder, der typisk fyrer med pulveriseret kul eller biomasse i en suspension af forbrændingsluft, at der kan lasttilpasses for variationerne i den vindmøllebaserede strømproduktion. De danske kraftvarmeværker har allerede i en del år været forpligtiget til at fyre med en vis andel af biobrændsler [2]. Det har medført en værdifuld erfaring hos el-værker og kedelproducenter med hensyn til anvendelsen af biomasse. Der foregår dog stadig en væsentlig og nødvendig vidensopbygning i samarbejde mellem danske universiteter, el-værkerne og dansk industri med henblik på at kunne drive biomassebaserede el-værker med høj rådighed, høj el-effektivitet samt lave emissioner.



Træpartikler, der pyrolyserer ved høj temperatur i en laminar flowreaktor.

### Grundlæggende udfordringer

Biomasse adskiller sig betydeligt fra kul i både kemiske og fysiske egenskaber. Dette medfører en række udfordringer på de fyringsanlæg, der omlægges til biomassefyring.

For at opnå en hurtig omsætning i fyrrummet neddeles kul typisk til en partikelstørrelse på mindre end 100 µm. Fiberstrukturen i biomasse gør brændslet svært at neddele tilsvarende og for at undgå et højt energiforbrug ved formaling anvendes typisk partikler på 1,5-2 mm i kraftværkskedlerne. De væsentligt større biomassepartikler nedsætter den effektive opvarmingshastighed, hvilket kan medføre en senere antænding, en længere omsætningstid og en mere ustabil flamme.

Biomasse består hovedsageligt af cellulose, hemi-cellulose og lignin, der i forhold til kul har et højt ilt-indhold, en relativ lav brændværdi og en lav termisk stabilitet. Op imod 80-95 vægt-% af biomassen afgives som flygtige bestanddele under pyrolysen. Tilsvarende vil de flygtige bestanddele for kul typisk være begrænset til omkring <35 vægt-% [3]. Den højere andel af flygtige bestanddele ændrer væsentligt på forbrændingsmekanismerne i forhold til kul, og ved afbrænding af biomasse flytter størstedelen af varmegivelsen til homogene gasfasereaktioner.

#### ■ Kul

- Skørt materiale, der kan knuses til meget fint pulver (<100 µm): Det giver hurtig opvarmning af de enkelte partikler.
- Energidensiteten er høj (~30 MJ/kg).
- Andelen af flygtige bestanddele er lav (typisk <35 vægt-%).
- Varme frigives primært ved langsom heterogen oxidation af koks.

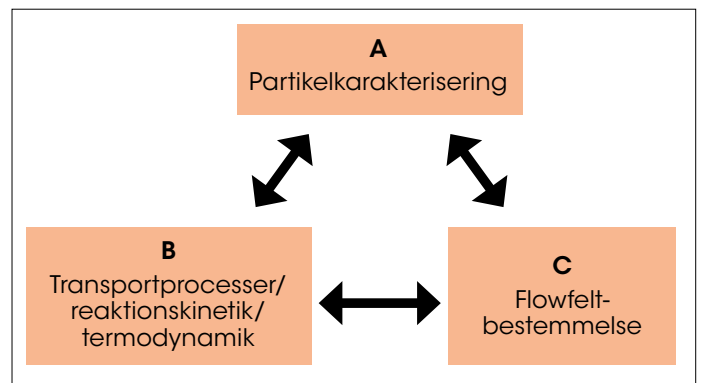
#### ■ Biomasse

- Opbygget af fibre, der gør brændslet svært at neddele. De store partikler (~0.1-2 mm) medfører langsom opvarmning og intern varmetransportbegrænsning.
- Lav energidensitet (~20 MJ/kg).
- Høj andel af flygtige bestanddele (80-95 vægt-%).
- Varme frigives primært ved hurtig homogen oxidation af flygtige gasser.

En forbedret modellering af biomasseflammer kræver inddragelse af en række forskellige fagdiscipliner, figur 1.

I det udførte ph.d.-projekt er der inddraget eksperimentel karakterisering af biomassepartiklers pyrolyse-egenskaber (A), udvikling af modeller for den enkelte biomassepartikel

(der kombinerer transportprocesser og reaktionskinetik (B)), samt anvendelse af CFD med henblik på at opnå forståelse af flowfelter og forbrændingsforhold i kedlen på makroniveau (C). Alle tre kategorier er væsentlige og indbyrdes koblede.



Figur 1. Indbyrdes afhængighed af centrale processer under partikkelforbrænding.

### Forbrænding af biomassepartikler

En af de store udfordringer ved overgangen til biomasse ligger i manglen på en god matematisk beskrivelse af den termiske nedbrydning af den organiske struktur ved høje temperaturer og opvarmingshastigheder – dvs. interaktionen mellem transportmekanismer og kemiske reaktioner på partikelniveau. Dette begrænser mulighederne for at modellere biomasseflammer og dermed at forudsige, hvordan nye brænderdesigns vil fungere. Figur 2 (side 24) illustrerer den principielle mekanisme, hvor det faste brændsel først gennemgår en opvarmnings- og tørringsfase (trin 1). Når temperaturen overstiger ca. 200°C, vil den organiske ▶



## Pipetteservice

Akkrediteret kalibrering  
Reparation • Vedligeholdelse

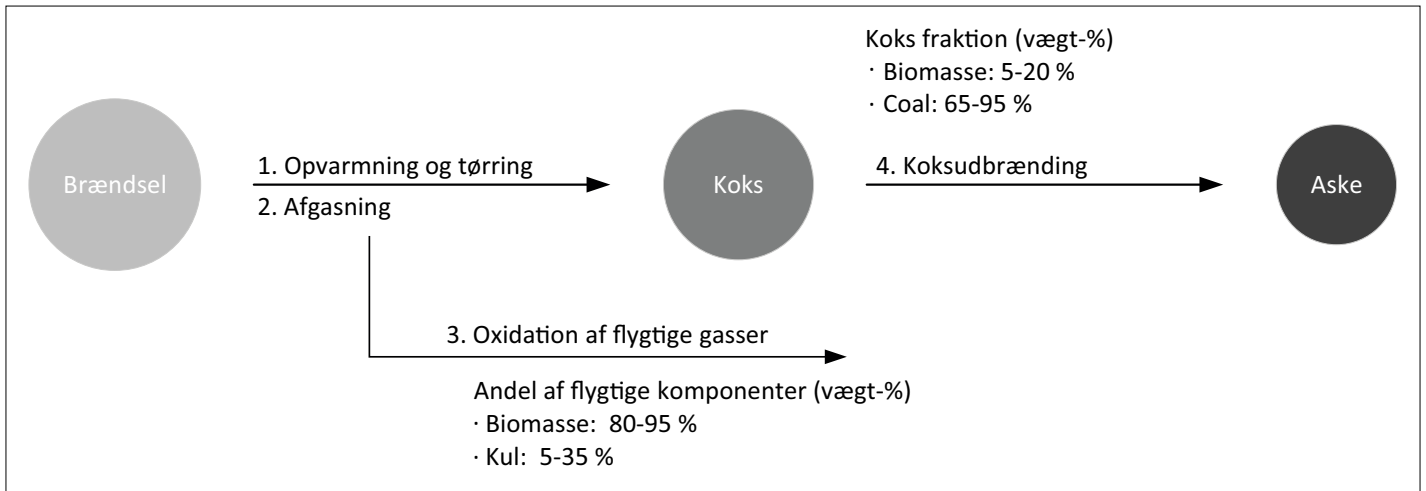
Gilson Center of Excellence • Certificerede teknikere • 20 års erfaring  
• Alle førende fabrikater • Elektroniske certifikater • Serviceaftaler



Biolab A/S,  
Sindalsvej 29, DK-8240 Risskov,  
Tlf: 8621 2866 Fax: 8621 2301  
E-mail: pipetteservice@biolab.dk  
www.biolab.dk



Cal. Reg. Nr. 482



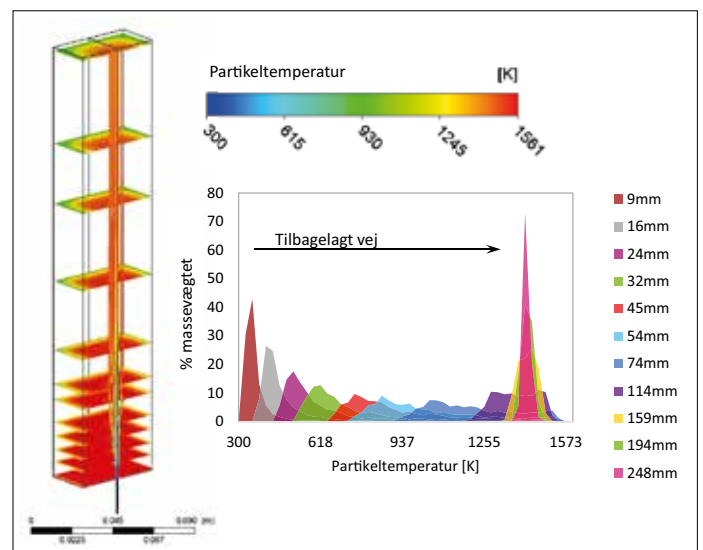
Figur 2. Grundlæggende mekanismer, der beskriver forbrændingen af partikler.

struktur begynde at blive nedbrudt under frigivelse af flygtige bestanddele (pyrolyse; trin 2). Denne nedbrydning accelereres med stigende temperatur, og den foregår hurtigere og ved lavere temperaturer for biomasse end for kul. De flygtige bestanddele oxideres herefter i gasfasen under frigivelse af varme (trin 3). Den homogene oxidation af de flygtige bestanddele udgør størstedelen af den totale reaktionsentalpi for biomasse, mens den heterogene oxidation af den tilbageværende koks udgør den største energifrigivelse for kulforbrænding (trin 4).

Ved at simulere kraftværkstilstande i mindre laboratorieopstillinger, hvor biomassepartiklers forbrænding undersøges [4], kan partikkelmodellering forbedres, figur 1B, og adskilles fra flowfeltbestemmelsen, figur 1C, og partikkelkarakterisering, figur 1A. Dermed kan de underlæggende modeller for partikelomsætningen udvikles uafhængigt af de øvrige faktorer.

### Kinetik-begrænset biomasse partikelforbrænding

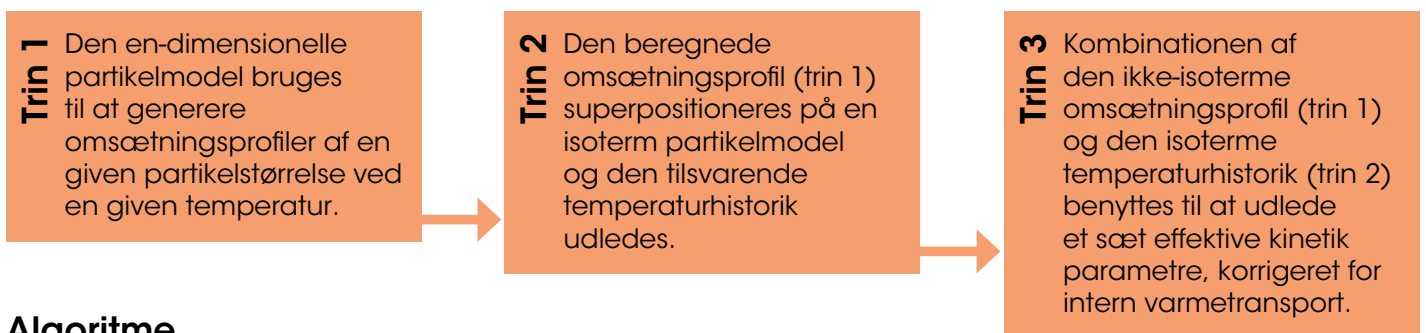
For små partikler (<100  $\mu\text{m}$ ) vil indflydelsen af transportmekanismer, såsom intern varmetransmission, være relativ lille, og hastigheden for partikelafgasning vil i store træk være kinetisk begrænset. I en flowreaktor, hvor brændelspartikler introduceres i en gasfyret pilotflamme, kan temperaturer og opvarmningshastigheder sammenlignes med de forventede forhold ved fuldskala suspensionsfyring. Tids- og temperaturhistorikken for partiklerne kan modelleres ved multifase CFD-beregninger, hvor kinetik-parametrene for afgasning af partiklerne opdateres iterativt. Et eksempel på temperaturhistorik-beregninger for biomassepartikler bestemt ved CFD-beregninger er vist i figur 3. Selve omsætningen af partiklerne følges eksperimentelt ved at spore calciumindholdet i partikler udtaget ved forskellige opholdstider på mellem 4 og 200 ms. Dermed kan en præcis karakterisering af den termiske proces foretages, og forløbet kan modelleres ved hjælp af simple hastighedsudtryk.



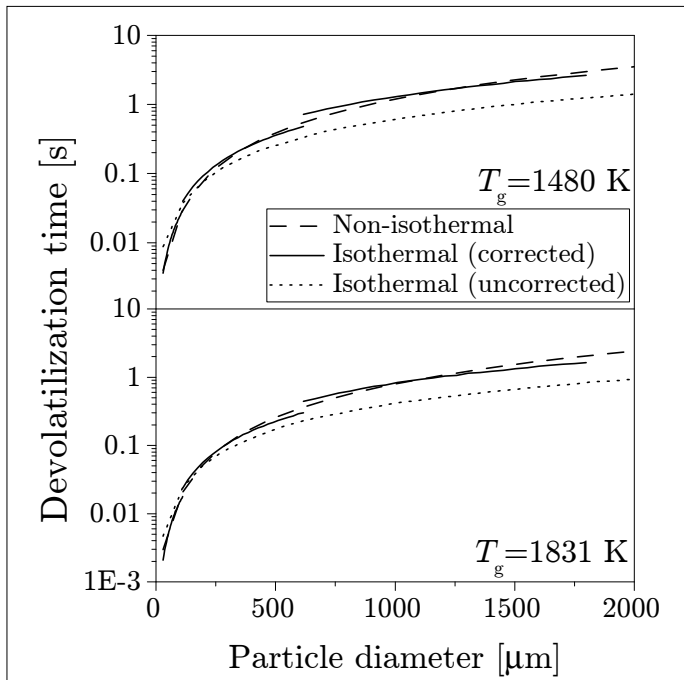
Figur 3. CFD-beregninger af temperaturhistorikker for partikler, der pyrolyserer efter direkte injektion i en laminar flowreaktor.

### Varmetransportbegrænset pyrolyse

For partikler større end ca. 100  $\mu\text{m}$  vil varmetransporten inde i partiklen foregå væsentligt langsommere end den eksterne varmetransport til partikeloverfladen. Den interne varmetransport begrænser derved hastigheden, hvorved partiklen omsættes. Ved at kombinere varmetransport gennem partiklen med passende eksperimentelt bestemte kinetiske udtryk, kan der udvikles en generisk model til brug for alle partikelstørrelser relevante for suspensionsfyring [5]. Modellen er baseret på en en-dimensionel betragtning af en partikel, hvor der tages højde for både vandfordampning og afgasning af flygtige bestand-



## Algoritme



Figur 4. Sammenligning af isotherm pyrolysemodellering hhv. korrigeret og ukorrigeret for varmetransportbegrænsninger. Beregningerne er sat op mod den detaljerede varmetransportmodel. Bemærk den logaritmiske tidsskala.

varmetransport og omsætning, figur 4. Her ses det, hvordan den ukorrigerede isotherme model afviger med en størrelsesorden fra den fulde en-dimensionelle varmetransportmodel. Ved anvendelse af modellen med korrigerede kinetiske data fås et langt bedre fit, som kan implementeres direkte i de kommercielle CFD-solvere.

### Konklusion

Ved at kombinere detaljeret matematisk modellering på partikelniveau med højtemperaturforsøg i laboratorieskala, er det lykkedes at udvikle simplificerede modeller for partikelkøring og pyrolyse, der kan implementeres direkte i eksisterende kommercielle CFD-solvere. Modellen resulterer i væsentligt forbedrede forudsigelser af omsætningen af biomassepartikler, uden at pålægge beregningerne forøgede krav til computerkraft. Indledende CFD-beregninger med den nye biomasse pyrolysemodel på hele biomasseflammer har vist forbedrede resultater med hensyn til prædiktion af flowmønstre og temperaturfelter.

E-mail:

Joakim M. Johansen: jjoha@kt.dtu.dk

### Kilder

1. Regeringen, "Vores energi", Klima-, Energi- og Bygningsministeriet, 2011.
2. Folketinget, "Aftale mellem regeringen (Venstre og Det Konservative Folkeparti), Socialdemokraterne, Dansk Folkeparti, Socialistisk Folkeparti, Det Radikale Venstre og Ny Alliance om den danske energipolitik i årene 2008-2011", Energistyrelsen, 2008.
3. M.A. Telfer and D.K. Zhang, Energy and Fuels, vol. 12, no. 6, pp. 1135-1141, 1998.
4. J.M. Johansen, R. Gadsbøll, J. Thomsen, P.A. Jensen, P. Glarborg, P. Ek, N. De Martini, M. Mancini, R. Weber and R. Mitchell, "Devolatilization Kinetics of Woody Biomass at Short Residence Times and High Heating Rates and Peak Temperatures", In press: Applied Energy, 2015.
5. J.M. Johansen, P.A. Jensen, P. Glarborg, M. Mancini, R. Weber and R. Mitchell, "Extension of Apparent Devolatilization Kinetics from Thermally Thin to Thermally Thick Particles in Zero Dimensions for Woody Biomass", In press, 2015.

dele koblet til varmetransport gennem partiklen. Modellen kan beskrive forløbet af partikelpyrolysen for helt små partikler på under 100  $\mu\text{m}$  og op til de større partikler på flere millimeter.

### Implementering af partikelmodellen i CFD-software

Pyrolysemodellen er udviklet med henblik på implementering i kommercielle CFD-solvere, såsom Ansys® Fluent®. De medfødte modeller for partikelforbrænding tillader udelukkende en isotherm modellering af faste brændsler. En sådan antagelse vil medføre en forkert frigivelse af flygtige bestanddele fra partiklen, da en isotherm betragtning netop ikke tillader en reaktionsfront at propagere gennem partiklen. Til gengæld er tilgangen yderst effektiv med hensyn til beregningskraft, da energibalancen løses ved en enkelt ligning. Det tilstræbes derfor at kunne modellere omsætningen isotermt, men samtidig tage højde for den varmetransportbegrænsning, der finder sted for større partikler. Dette har ladet sig gøre gennem algoritmen, som ses nederst på side 24.

Ved at kompensere for varmetransportbegrænsningerne i de isotherme simuleringer opnås der med den fremsatte model en betydelig bedre tilpasning til de detaljerede modeller af fuld



Fuldskala 30 MW biomasseflamme.

**HIGH PERFORMANCE CRUSHING**

**Retsch®**  
Solutions in Milling & Sieving

RETSCH's new benchtop jaw crusher BB 50 reduces hard, brittle and tough samples with a feed size of up to 40 mm in one single operation to a final fineness of down to 0.5 mm!

**SKANLAB**

Kvinderupvej 30 · 3550 Slangerup · Tlf: 4738 1014 · www.retsch.dk