

10. Forgasning og andre kraftvarmeteknikker

Kraftvarmeproduktion i mindre skala er aktuelt for fjernvarmeværker, større institutioner og industrivirksomheder og har markeds-potentiale i både ind- og udland. En væsentlig drivkraft bag udviklingen af forgasningsanlæg er udsigten til højere elvirkningsgrader end f.eks. damp turbineanlæg kan præstere i samme anlægsstørrelse. Her omtales danske udviklingsprojekter med pilot- og demonstrationsanlæg, som blandt andet støttes af Energistyrelsens Udviklingsprogram for Vedvarende Energi. Projekterne arbejder med kraftvarmeproduktion med forskellige systemer som modstrømsforgasning, flere former for medstrømsforgasning, stirlingmotor og dampmotor.

Kraftvarme med termisk forgasning

Sæt en forbrændingsmotor til at drive en elgenerator og udnyt motorens spildvarme til fjernvarme. Så let er det at bygge mindre kraftvarmeværker med naturgas som brændstof. Lige så let går det ikke, når brændslet er træ. Ikke engang som pulver kan træ bruges direkte som brændstof i en forbrændingsmotor eller eventuelt en turbine. Træet må først omdannes til gas, og det kan gøres ved en forgasningsproces i en gasgenerator, der også kaldes en forgasser. Kunsten i forgasning er at få omdannelsen fra træ til gas til at foregå med mindst muligt tab, og således at den producerede brændbare gas - produktgassen - bliver så ren som muligt. Gasmotoren tager skade, hvis gassen indeholder tjære og partikler, og der må ikke komme problemer med spildevand fra processen. Det er mange krav, som skal opfyldes samtidigt.

Til automobil drift blev under anden verdenskrig brugt tørrede bøgeklodser på størrelse med tobaksdåser. Det er et brændsel, som i dag kun kan skaffes i meget begrænsede

mængder til overkommelige priser. På dagens marked findes især brændselsflis, men det er normalt vådt, når det kommer direkte fra skoven. Brændselsflis koster imidlertid så meget mindre end gas og olie, at der bliver råd til at investere i den omfattende teknik, der behøves, for at kraftvarme baseret på forgasning kan fungere.

For at fremstille brændbar gas må træet først opvarmes. Det er mest almindeligt at opvarme ved at forbrænde en mindre del af træet. Opvarmningen tørrer brændslet, og først derefter kan temperaturen øges. Ved en temperatur på omkring 200 °C starter den såkaldte pyrolyse, hvor træets flygtige bestanddele afgives. De består af en blanding af gasser og tjærestoffer. Når pyrolysen er til ende, er træet omdannet til flygtige bestanddele samt en fast kulstofrest (koks).

Koksen kan omsættes til gas ved at tilsætte et forgasningsmiddel som typisk kan være luft, kultveilde eller vanddamp. Hvis CO₂ eller H₂O anvendes, kræver denne proces varme og forløber kun med rimelig hastighed ved temperaturer over ca. 800 °C. De brændbare bestanddele i produktgassen er primært kulilte, brint og lidt metan. Tilsammen udgør de ca. 40% af gassens volumen, når der bruges luft til forgasningen, mens resten er ubrændbare gasser som kvæl-

stof og kultveilde. Hovedparten af tjærestofferne fra pyrolysen kan omdannes til gas, hvis de opvarmes til 900-1.200 °C f.eks. ved passage gennem en varm koksforgasningszone.

Der er udviklet mange forskellige typer af gasgeneratorer i de ca. 100 år, teknikken har været kendt. I reglen opdeles gasgeneratorer i typer efter, hvordan brændsel og luft tilføres i forhold til hinanden. I det følgende omtales udviklingsprojekter, der benytter sig af modstrømsforgasning og medstrømsforgasning. Andre forgasningsprincipper findes også, som f.eks. fluid bed forgasning, der især har sin styrke til store anlæg. Atmosfærisk fluid bed forgasning af træ i store anlæg må anses for fuldt udviklet i udlandet. Også tryksat fluid bed forgasning er benyttet til kostbare demonstrationsanlæg i udlandet. Den udenlandske udvikling følges, men der er ikke i øjeblikket planer om at få anlægstypen etableret til træ i Danmark.

Modstrømsforgasning

I modstrømsgasgeneratorer suges forbrændingsluften ind under risten i bunden og passerer brændslet nedfra og op (figur 28). Brændsel tilføres i toppen af forgasseren, så brændslet bevæger sig mod luft- og gasstrømmen. I traditionelle typer vil alle stoffer, der dannes under brændslets opvarmning, herunder tjære og eddi-

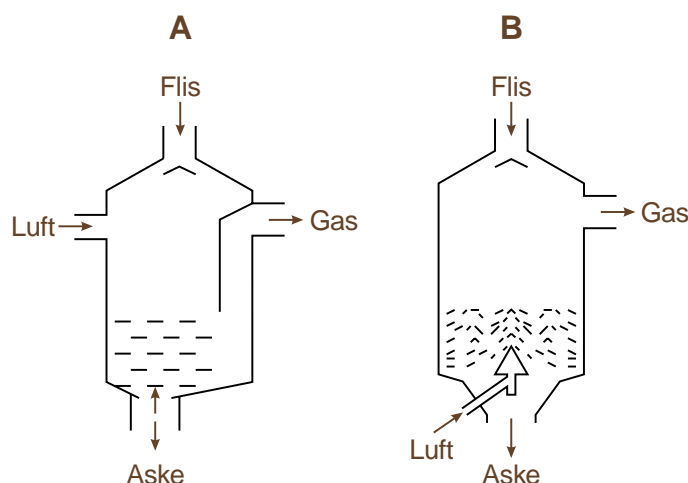
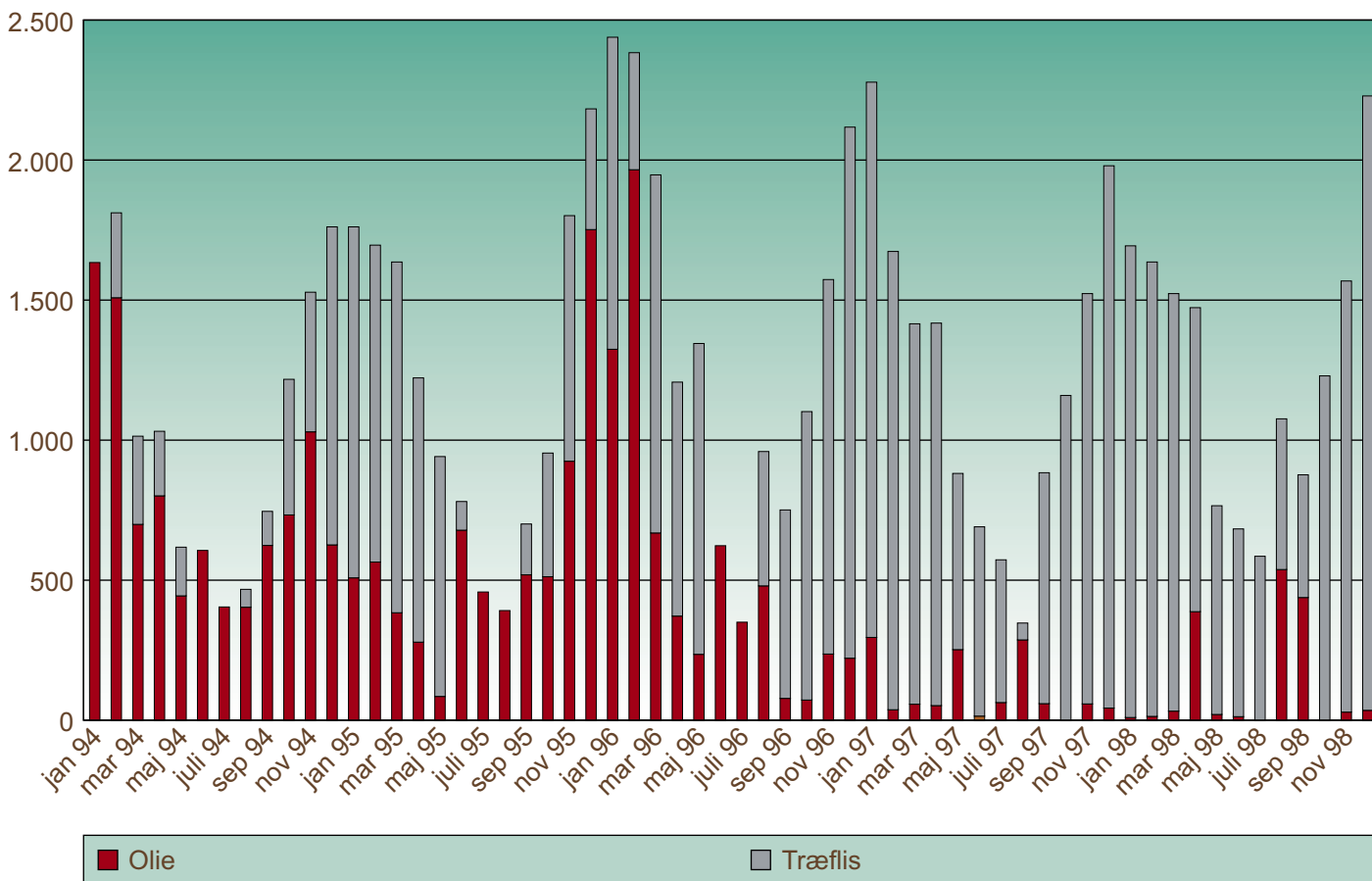


Fig 28: Skitse af gasgeneratorprincipper, A - medstrømsgenerator, B - modstrømsgenerator, /ref. 77/.

Indfyret (MWh)



grafik: ansaldo vølund a/s

Figur 29: Da Harboøre Varmeværk startede, blev der brugt meget olie til varmforsyningen og kun lidt flis, men den tid er forbi. Brændselsforbruget af olie og træflis i hver måned illustrerer, hvordan billedet for alvor blev vendt i 1996. De sidste par år har forgasningsanlægget dækket over 90% af byens varmebehov, og rollen som statist er overladt til oliekedlen.

kesyre, forlade gasgeneratoren uden først at blive sønderdelt. Helt op til 20-40% af energien kan i de tilfælde være bundet i denne tjære. Først efter en intensiv rensning kan gassen bruges til motordrift, så anvendelsen af modstrømsforgasning sammen med træ stiller store krav til gasrensingsanlægget. Af samme årsag blev modstrømsforgasning i 1940'erne mest brugt til tjærefattigt brændsel som antracit og koks. /ref. 77/. Modstrømsforgasnings store fordel ligger i evnen til at forgasse både meget vådt brændsel (op til ca. 50% vandindhold), og brændsel med lavt slaggesmeltepunkt som f.eks. halm.

Medstrømsforgasning

Medstrømsgasgeneratorer fyret med træ var det altdominerende princip til drift af motorkøretøjer under anden verdenskrig. Brændslet tilføres i toppen af forgasseren og bevæger sig nedad under processen. Luften til-

føres enten i generatorens midterste del eller i toppen ovenover brændselslaget (Open Core princip) og bevæger sig nedad i samme retning som både brændsel og den udviklede gas (figur 28). For tjæredannende brændsel som træ er dette princip særligt anvendeligt, fordi tjære, organiske syrer og andre pyrolyseprodukter føres ned gennem forbrændingszonen og sønderdeles til lette brændbare forbindelser på gasform.

Medstrømsforgasningsprincippet har i sin traditionelle udformning den ulempe, at det er uegnet til brændsler med lavt askesmeltepunkt. Halm er derfor uegnet, mens træ kan anvendes med godt resultat. En anden svaghed er, at der kræves et forholdsvist tørt brændsel med vandindhold på maksimalt 25-30%. Når brændsel leveres direkte fra skoven, må det derfor tørres, inden det kan fyres i en medstrømsgasgenerator. En modificeret udgave af med-

strømsforgasseren udvikles efter et tottrinsprincip på Danmarks Tekniske Universitet, og med denne konstruktion er det lykkedes at forbedre medstrømsforgasseren på dens svage punkter.

Anlæg under udvikling

Modstrømsforgasningsanlæg i Harboøre

Ansald Vølund A/S har opført og driver et fuldskala forgasningsanlæg i Harboøre. Anlægget er beregnet til almindelig skovflis, der kan indfyres uden forudgående tørring. Det har en indfyret effekt på 4 MW og består af en modstrømsforgasser, gasrensning og en gasbrænder monteret på en kedel, hvor gassen afbrændes til varmeudvikling. Varmen aftages af Harboøre Varmeværk. Værket har været i drift med ren varmeudvikling siden 1993, og er det forgasningsanlæg i verden, der har flest

ubemandede driftstimer på skovflis. Samtidig har anlæggets driftssikkerhed udviklet sig konstant i positiv retning, og tenderer nu til endda at overgå driftssikkerheden for almindelige flisfyrede værker.

Målet med anlægget er, at der skal produceres både elektricitet og varme. Dette kræver en omfattende gas- og vandrensning, fordi våd flis producerer en gas, der indeholder relativt store kondensatmængder, som er tjæreholdige. Der har foregået en koncentreret indsats for at rense gassen til et niveau, så den kan bruges i gasmotorer. Dette mål forventes nu at være opfyldt, så i 1999 installeres to gasmotorer med en samlet effekt (garantidata) på 1,3 MW_{el}. Anlæggets elvirkningsgrad regnet fra brændsel til el estimeres til ca. 32% ud fra driftsdata for forgasningsanlægget og motorleverandørens oplysninger. Driftsresultaterne skal herefter vise, om teknikken med medstrømsforgasning til kraftvarmeproduktion nu er klar til markedsføring.

Totrins medstrømsforgasningsanlæg

Siden midten af 1980'erne har Danmarks Tekniske Universitet (DTU), Lyngby, arbejdet med forgasning af biomasse. I starten var aktiviteterne koncentreret om forgasning af halm, og nye processer blev udviklet. Totrinsprocessen har fået sit navn, fordi pyrolyse og koksforasning foregår adskilt fra hinanden. Et anlæg blev bygget med 50 kW indfyret effekt, og det lykkedes for første gang at få demonstreret motordrift på halm med dette anlæg. Udviklingen er derefter blevet vendt mod træ.

På DTU står i øjeblikket et anlæg med 100 kW indfyret effekt og en forsøgsmotor tilkøbet. Sammen med Maskinfabrikken REKA A/S er endvidere opført et komplet anlæg med 400 kW indfyret effekt og 100 kW gasmotor på et landbrug i Blære. Anlægget i Blære har kørt i flere end hundrede timer med kraftvarmeproduktion fra gasmotoren. DTU har i detaljer både teoretisk beskrevet og praktisk eftervist den anvendte forgasningsproces, så processen nu må anses for færdigudviklet. De praktiske afprøvninger har vist, at

anlægget er i stand til at producere muligvis den reneste gas, som er set fra forgasningsanlæg. Den kendetegnes også af et højt brintindhold. Totrinsanlægget kan anvende højere vandindhold i brændslet end andre typer af medstrømsforgasning, og grundet den effektive forgasningsproces er kondensatet fra gasrensningen så rent, at det formodentlig kan bortledes uden nogen videre behandling. Da processen anvender udstødningsvarme fra en tilknyttet motor som energikilde til pyrolysen, har denne forgasser en høj virkningsgrad.

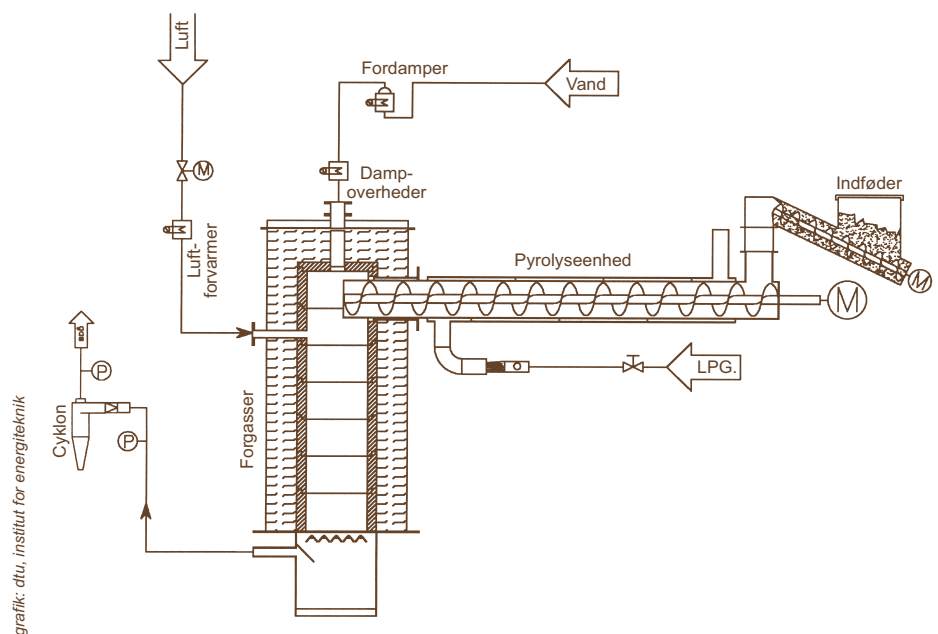
Medstrømsforgasning i Høgild

Fjernvarmenettet i landsbyen Høgild har et medstrømsforgasningsanlæg som hovedforsyning. Anlægget er opført af Herning Kommunale Værker. Efter gassen fra gasgeneratoren er rensat ved at passere en våd scrubber og et filter, bruges den som brændstof i en gasmotor tilkøbet en elgenerator. Som på de oprindelige medstrømsforgassere tilføres luften i den midterste del af anlægget. Der fyres med tørrede klodser af industri-

træ, mens det endnu ikke har været muligt at anvende skovflis med godt resultat. Gasgeneratoren blev oprindeligt købt i Frankrig i 1993, men måtte i slutningen af 1997 gennem en total udskiftning. Kun gasmotoren og filtre fra den franske leverance blev bevaret. Til erstatning blev opstillet en ny dansk konstruktion af medstrømsforgasseren fra Hollensen Ingeniør- og Kedelfirma ApS. Det ombyggede værk kom i drift i januar 1998 og har allerede haft flere end 1.500 timers drift med elproduktion /ref. 78/. Det er dermed det danske forgasningsanlæg, som indtil videre (november 1998) har flest præsterede driftstimer med elproduktion. Den indfyrede effekt er ca. 500 kW, mens den afgivne eleffekt er ca. 120 kW. Elvirkningsgraden opgives til 19-22%.

Open Core medstrømsforgasning

Udviklingsprojektet, der begyndte som et skitseprojekt med dk-TEKNIK ENERGI & MILJØ som projektansvarlig, tog udgangspunkt i skovflisens brændselsegenskaber og forgasningsprincippet Open Core, der havde vist lovende resultater i udlandet med træflis.



grafik: dtu, institut for energiteknik

Figur 30: DTU's 100 kW totrinsforgasser består af indfoder, opvarmet pyrolyseenhed, en forgasningsreaktor samt luft- og damptilsætning. Flisen transporteres fra indfoderen til pyrolyserøret. I forsøgsanlægget opvarmes pyrolyserøret med varme fra en LPG-gasbrænder, der strømmer i en kappe udenpå pyrolyserøret (ved "rigtige" anlæg anvendes udstødningsgas). Pyrolyseprodukter og koks ledes ind i toppen af forgasseren, hvor luft og pyrolysegas opblandes. Den producerede gas ledes gennem koksen og ud af forgasningsreaktoren, hvorefter de største partikler udskilles i en cyklon.

Anlægskonceptet er beregnet til almindelig våd skovflis, der tørres i en gennemløbstørrer med restvarme fra gasmotoren, inden den når gasgeneratoren. I 1995 begyndte fremstilling og afprøvning på Sjælland af et pilotanlæg med gasgenerator og gasrensning. Anlægget har en indfyret effekt på 210 kW og kan forsyne en gasmotor med en ca. 50 kW elgenerator. I den udviklede Open Core gasgenerator tilsættes luften i flere trin til processen, så der i stil med DTU's totrinsforgasser sker en delvis afbrænding af pyrolysegassen, inden den passerer gennem kokslaget.

Hidtil har pilotanlægget haft omkring 350 bemandede timers drift i forbindelse med afprøvninger. I november 1998 blev en gasmotor tilkoblet for også at få praktiske driftserfaringer med motordrift. Ved første egentlige start af motoren blev kørt 24 timers uafbrudt motordrift, før det blev valgt at stoppe afprøvningen. Dette blev fulgt op med en driftsafprøvning over fem døgn i december 1998, hvor der med succes blev gennemført 100 timers uafbrudt forsøgsdrift med anlægget. Heraf var der 86 timer med motordrift.



foto: biopress/torben skøtt

Forgasningsanlægget i Høgild er nu bygget helt om, så det kan leve op til dansk standard. Preben Jensen fra Herning Kommune Værker foran den nye forgasser.

Nye forgasningsprojekter

I slutningen af 1998 er flere nye forgasningsprojekter sat i gang. Thomas Koch Energi A/S udvikler en medstrøms totrins Open Core forgasser baseret på De La Cottés princip. Forgasseren skal produceres i størrelser fra 50-1.000 kW_{el} og bruger træflis som brændsel. Forgasseren består af en internt opvarmet pyrolysenhed, der er placeret over et brændkammer og en koksforgasser. I pyrolyseenheden deles flisen i tjæreholdig gas og koks. Den tjæreholdige gas afbrændes i brændkammeret, og koksen forgasses ved hjælp af varmen fra gasafbrændingen. Gas ledes via en cyklon, en køler og et filter til en motor, hvor der produceres el og varme. Anlægget, der er på 60 kW_{el}, finansieres af Energistyrelsen og Thomas Koch Energi A/S og forventes sat i drift i august 1999.

Danish Fluid Bed Technology ApS (DFBT) og Danmarks Tekniske

Universitet, Institut for Energiteknik arbejder med støtte fra Energistyrelsen på at afprøve og videreudvikle en innovativ cirkulerende fluid bed (CFB) forgasser. Forgasseren er i første omgang tænkt anvendt som såkaldt forkoblet forgasser, dvs. til samfyring med halm på kraftværker. Forgasseren kan fungere ved relativ lav temperatur, således at både problematisk askesmeltning og rågaskøling undgås. Konceptet forventes også velegnet til andre typer biomasse herunder findelt tørt træ. Byggehøjden vil være betydeligt mindre end i normale CFB-forgassere, hvilket medvirker til, at forgasseren måske også kan blive konkurrencedygtig i størrelser ned til 1-2 MW indfyret effekt. Der kan således produceres brændbar gas til bl.a. mindre kedler, indirekte fyrede gasturbiner og (større) stirling-motorer. Der opføres lige nu et forsøgsanlæg med en indfyret effekt på 50-75 kW på DTU, og de første driftserfaringer med halm fremkommer i foråret 1999.

KN Consult ApS har fået bevilliget et beløb af Energiministeriet til at dimensionere, opføre og køre test på en 150 kW testforgasser til forgasning af halm efter modstrømsforgasningsprincippet. Testforgasseren er et forprojekt til det egentlige projekt "Modstrømsforgasning af halm", der omhandler dimensionering og idriftsættelse af et 500 kW testanlæg til halmforgasning. Arbejdet vil blive udført i samarbejde med KN Consult Polska Sp. z o.o. i Polen, og resultaterne fra 150 kW anlægget vil foreligge i løbet af 1999.

Kraftvarme med forbrænding

De hede røggasser fra almindelig forbrænding i fyringsanlæg af biomasse kan også udnyttes til kraftvarmeproduktion i mindre skala. To igangværende udviklingsprojekter med henholdsvis en stirlingmotor og en dampmotor skal bevise det i praksis.

Stirlingmotor

I stirlingmotoren er der ikke en brændbar gasblanding i motorens cylindre, men blot en luftart som arbejdsmedie, der skiftevis opvarmes og afkøles. Varmen til stirlingmotorens arbejdsmedie skaffes fra en forbrændingsproces, som det kendes fra normale ristefyrede anlæg. Overføringen af varmen fra forbrændingsprocessen til motorens arbejdsmedie sker over en varmeveksler.

På Danmarks Tekniske Universitet (DTU) arbejdes med udvikling af tre motorer med effekter på hhv. 9, 35 og 150 kW i tre adskilte projekter. Motoren på 9 kW_{el} er beregnet til gasformigt brændsel f.eks. naturgas og biogas og omtales ikke yderligere. 35 kW_{el}-motoren støttes af Energistyrelsen og gennemføres i samarbejde med firmaerne Danstoker a/s, I.B. Bruun og Klee & Weilbach. Maskinfabrikken REKA A/S har udviklet forbrændingssystemet til det første anlæg i samarbejde med Planenergi A/S. Ansaldo Vølund A/S udvikler forbrændingssystemet til det næste anlæg.

Design af en 150 kW motor er gennemført med støtte fra ELKRAFT A.m.b.a., men projektet er stillet i bero i 1998. Beslutningen om eventuelt at fremstille en prototype afventer bl.a. erfaringerne fra 35 kW_{el}-motorerne.

DTU's stirlingmotor er udviklet direkte til anvendelse af biomasse. Hedefladens udformning er sket ud fra erfaringerne med de typer biomasseanlæg, som arbejder ved høje temperaturer. Det er karakteristisk for DTU's motor, at den er hermetisk på samme måde som en hermetisk kølekompresor. Elkablet er dens eneste eksterne forbindelse, og også kablets gennemføring er tætnet. Inde i den tryksatte motorkappe ligger både motorens mekaniske dele, der har fedtsmurte lukkede lejer, og selve elgeneratoren. De vanskeligheder med lækager af arbejdsgas og olie i arbejdsvolumnerne, som andre producenter af stirlingmotorer har døjet med, er her undgået.

En høj temperatur på hedefladerne er afgørende for en høj virkningsgrad for motoren. I praksis vil det sige 650-700 °C, så når røggassen forla-

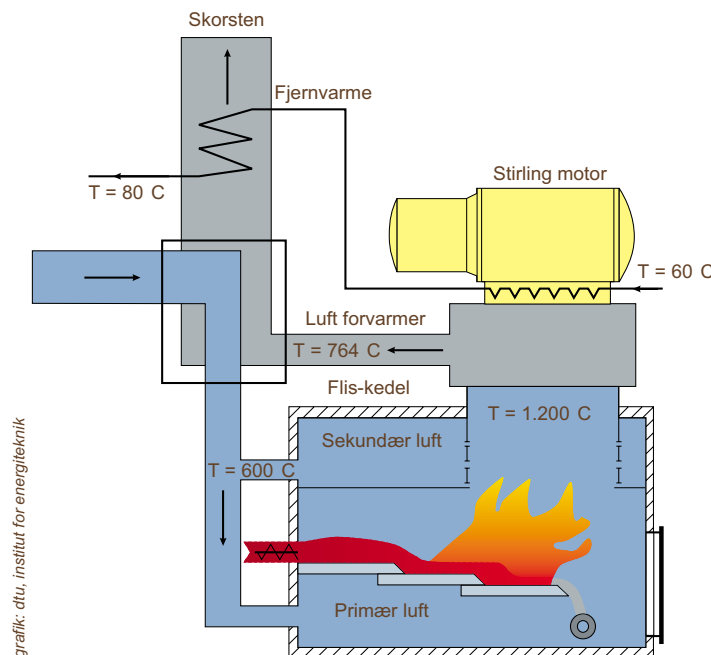
der hedefladen indeholder den stadig meget energi. Den varme røggas efter motoren udnyttes til at forvarme forbrændingsluften, og først derefter bruges resten af røggassens varme i en kedel. Den varme forbrændingsluft hæver hele temperaturniveauet i forbrændingssystemet og stiller særlige krav til forbrændingskammerets udformning og materialevalget. Der er især taget hensyn til risikoen for slaggedannelse og belægningsdannelse på motorens hedeflader ved udformningen af forbrændingssystemet til motoren. Hedefladen er også designet ud fra hensyn til partikelindholdet i røggassen. Der er anvendt store dimensioner og afstande mellem hedefladens rør for at undgå, at aflejringer lukker den til.

Et komplet demonstrationsanlæg med 35 kW_{el}-motoren til fyring med skovflis er udviklet og sat i drift. Anlægget er opstillet på et landbrug ved Løgstør og har hidtil haft ca. 700 timers drift (september 1998) med kraftvarmeproduktion. Det er sandsynligvis den første stirlingmotor i verden, der har demonstreret ubemandet fuldautomatisk drift gennem længere tid med skovflis som brændsel. Elvirkningsgraden er målt til 18-19% ved drift på skovflis med 49% vandindhold. Den samlede udnyttelsesgrad af brændslet er målt til over 90%. Det har kun været nødvendigt at rense motorens hedeflader en gang efter ca. 500 timers drift

/ref. 79/. Med konstruktionen er det således lykkedes at slippe for problemer med støv og slagge, der ellers hurtigt kan lukke hedefladerne med belægnings, og der er heller ikke tegn på korrosion. De positive erfaringer med hedefladens design er blandt de væsentligste delmål i projektet. Afprøvningen har også vist, at anlægget kan benytte flis og bark med op til 60% vandindhold. Det er sandsynligvis den kraftige luftforvarmning som medvirker til anlæggets tolerante holdning overfor brændslets vandindhold.

Medregnes de indledende afprøvninger af motoren med naturgas, har den sammenlagt haft over 1.000 driftstimer. Det er en præstation, der kan betegnes som et egentligt gennembrud for stirlingmotoren, så DTU's motor tegner til at blive et virkeligt lovende system til kraftvarmeproduktion i lille skala.

Med støtte fra Energistyrelsen er en ny 35 kW_{el}-motor under fremstilling. Motorens design er revideret på basis af erfaringerne med den første 35 kW_{el}-motor. Den nye motor er væsentligt enklere at fremstille og samle end den første prototype. Samtidig ventes den nye motor at have forbedrede driftsegenskaber. Motoren udstyres med en højtemperatur gasbrænder og en modstrømsforgasser til flis, som udvikles af Ansaldo Vølund A/S. Anlægget ventes klar til afprøvning i sidste halvdel af 1999.



grafik: dtu, institut for energiteknik

Figur 31: Fyringsanlægget til den første stirlingmotor er baseret på en almindelig kedel, som er modificeret, så askepartiklerne ikke afsættes på motorens hedeflader. Elgeneratoren er indbygget i motoren, så alle bevægelige dele er under tryk, og lækager undgås.

Dampmotor

Dampmotorer er en gammelkendt teknik, der kom før forbrændingsmotoren. Den regnes faktisk som igangsætteren for hele den vestlige industrialisering, fordi den effektivt - i datidens målestok - kunne levere mekanisk energi til industri-maskinerne. I dag har den stadig potentiale til kraftvarme i den mindre skala.

Med henblik på at fremstille en moderne dampmotor udvikles en

prototype af Milton Andersen A/S og dk-TEKNIK ENERGI & MILJØ. Målet er at komme udenom de tekniske ulemper og lave virkningsgrader, som før i tiden var forbundet med dampmotorer. Projektet støttes af Energistyrelsen og EU.

De væsentligste ulemper ved de gamle typer motorer var, at smørelielækager ved cylindrene ødelagde dampkvaliteten, og at den gammel-dags gliderstyring af ventilerne betød lav virkningsgrad.

Der er fremstillet en 2-cylindret prototype med damptryk på 24 bar og damptemperatur på 380 °C med olie-frie stempelringe af grafit og PC-kontrollerede servohydraulisk styrede ventiler. Prototypen er beregnet til at yde 500 kW_{el}. De indledende afprøvninger af prototypen er gennemført, og den er nu ved at blive tilsluttet en dampforsyning på en sjællandsk industrivirksomhed med henblik på belastningstest samt eventuelt længere tids afprøvning af motoren.