

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Fördelning av flykt vid inmatning av fasta bränslen i fluidiserad bädd	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Distribution of volatiles over the cross-section of a fluidized bed when using fold fuels	
Universitet/högskola/företag Chalmers Tekniska Högskola	Avdelning/institution Inst f Rymd- geo- och miljövetenskap Avd f Energiteknik
Adress 412 96 GÖTEBORG	
Namn på projektledare Anders Lyngfelt	
Namn på ev övriga projektdeltagare Xiaoyun Li (doktorand), Carl Linderholm (bihandledare), Tobias Mattisson (examinator, huvudhandledare)	
Nyckelord: 5-7 st Flyktfördelare, fluidiserad bädd, kemcyklisk förbränning, minusutsläpp, koldioxidinfångning, klimat, koldioxid	

Förord

Projektet har finansierats av Energimyndigheten. Utöver de som direkt avlönats av projektet har även professor Tobias Mattisson, avlönad av Chalmers, deltagit i projektet. Projektet har också utnyttjat infrastruktur som byggts upp under tidigare projekt.

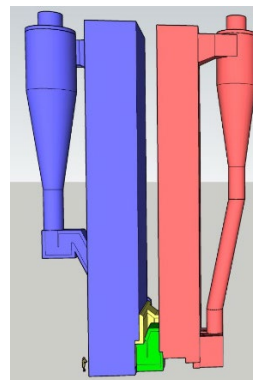
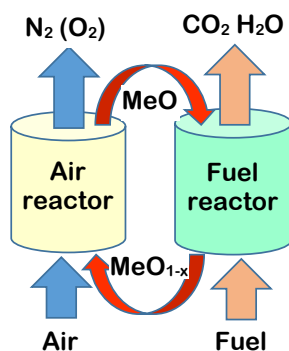
Innehållsförteckning

Sammanfattning	2
Summary	3
Inledning/Bakgrund	4
Genomförande	6
Resultat	9
Diskussion.....	13
Publikationslista.....	15
Referenser, källor.....	17
Bilagor	17

Sammanfattning

Projektet har handlat om utveckling av en ny teknik som kan minska kostnaden för koldioxidinfångning dramatiskt. Den kan användas vid förbränning gasformiga, fasta och flytande bränslen. I detta projekt är fokus på biomassa, alltså bio-CCS/minusutsläpp. Tekniken kan få stor betydelse för att klara de globala klimatmålen.

Kemcyklisk förbränning (CLC¹) är en helt ny förbränningsprincip där förbränningsluftens syre överförs till bränslet med hjälp av en syrebärare. Tekniken använder två sammankopplade fluidiserade bäddar där syrebäraren, som utgörs av metalloxidpartiklar, ”MeO”, används som bäddmaterial, Figur 1a. I luftreaktorn tar syrebäraren upp syre från luft, och i bränslereaktorn reagerar bränslet med syrebäraren till koldioxid och vattenånga. Exempel på lämpliga syrebärarmaterial är billiga, naturligt förekommande malmer som ilmenit, manganmalm och järnmalm. En CLC-panna kan designas som två ihopkopplade CFB[†]-pannor, Figur 1b. Tekniken har den uppenbara fördelen att koldioxid kan fångas in utan dyr och mycket energikrävande gasseparation. Detta beror på att förbränningsluften och bränslet aldrig blandas, vilket gör att förbränningsprodukterna koldioxid och vatten lämnar processen i ett eget flöde. Vattenångan avskils enkelt från koldioxiden genom kondensation och idealt fås då en ren koldioxid.



Figur 1a. Kemcyklisk förbränning

Figur 1b. 40 m hög 200 MW CFB-CLC

För att få god hög omvandling av gasen, är det viktigt att skapa en god kontakt mellan syrebärarpartiklar och de brännbara gaser som frigörs från bränslet. Om bränslereaktorn utformas som en cirkulerande fluidiserad bädd, fås god kontakt i risern. I detta projekt har fokus varit på att också skapa god kontakt i bottendelen av bränslereaktorn, alltså hur man, över ett horisontellt tvärsnitt, kan fördela de flyktiga ämnen som frigörs när ett fast bränsle, t.ex. högflyktig biomassa, matas in i en fluidiserad bädd. Med flyktiga ämnen, eller flyktgasen, avses den blandning av brännbar gas som frigörs när fasta bränslen upphettas då de matas in i en het fluidiserad bädd. För biomassa utgör flyktgasen huvuddelen av bränslets värmevärde.

¹ CLC står för Chemical-Looping Combustion, [†] CFB står för Cirkulerande fluidiserad-bädd

Målet för projektet har varit att utarbeta och undersöka förslag till design av ett nytt koncept som kallas ”flyktfördelare” som kan integreras med bränsleinmatningen i bränslereaktorn. I projektet har hydrodynamik och gasfördelningen för denna flyktfördelare undersökts i en 8,5 m hög kallmodell av en cirkulerande fluidiserad bädd.

Först har en enkel grunddesign och sedan olika förbättringar/modifieringar av flyktfördelaren studerats. Resultaten visar hur flyktfördelaren ger en förbättrad fördelning av simulerad flyktgas och hur olika modifikationer ytterligare förbättrar resultaten så att flyktgasen fördelas jämnt över tvärsnittet.

Flyktfördelaren har studerats under olika fluidiseringsregimer och med olika flöden av simulerad flyktgas. Även fluidiseringstillståndet har studerats med analys av tryck och tryckfluktuationer samt filmning/fotografering. Eftersom kallmodellens väggar är av plexiglas går det att se både vad som händer i risern och i fördelaren.

Projektet visar alltså att en flyktfördelare kan användas för att få god kontakt mellan flyktgas och bäddmaterial/syrebärare. Det visar också hur flyktfördelaren kan konstrueras för att få jämn fördelning av gasen. Resultaten från projektet är användbara i alla processer där god kontakt mellan bäddmaterial och flykt är en förutsättning för ett gott resultat. De är alltså relevanta för framtida bränsleomvandlingsprocesser som kemcyklisk förbränning/förgasning och termisk förgasning. Dessa processer förväntas bli viktiga för att nå framtida mål för klimat, miljö och energitillförsel.

Summary

The project concerns the development of a new technology that can dramatically reduce the cost of carbon dioxide capture. It can be used when burning gaseous, solid and liquid fuels. In this project, the focus is on biomass, i.e. bio-CCS for negative emissions. The technology can be of great importance in meeting the global climate goals.

Chemical-looping combustion (CLC) is a new combustion principle where the oxygen of the combustion air is transferred to the fuel with the help of an oxygen carrier. The technology uses two interconnected fluidized beds where the oxygen carrier, which consists of metal oxide particles, is used as bed material. In the air reactor, the oxygen carrier takes up oxygen from air, and in the fuel reactor, the fuel reacts with the oxygen carrier to form carbon dioxide and water vapor. Examples of suitable oxygen carrier materials are cheap, naturally occurring ores such as ilmenite, manganese and iron ore. The technology has the advantage that carbon dioxide can be captured without expensive and energy-intensive gas separation. This is because the combustion air and fuel are never mixed, which means that the combustion products carbon dioxide and water leave the process in a separate flow. The water vapor is easily separated from the carbon dioxide through condensation, and ideally pure carbon dioxide is then obtained.

In order to obtain good high conversion of the gas, it is important to create a good contact between oxygen carrier particles and the combustible gases released from the fuel. If the fuel reactor is designed as a circulating fluidized bed, good contact is obtained in the riser. In this project, the focus has been on creating good contact also in the bottom part of the fuel reactor. The question is, how to distribute, across the bottom horizontal cross-section, the volatiles released when solid fuel, e.g. highly volatile biomass, is fed into a fluidized bed. Volatile gases, or volatiles, refer to the mixture of gases that are released when solid fuels are heated when they are fed into a hot fluidized bed. For biomass, the volatile gases constitute the main part of the fuel's calorific value.

The goal of the project has been to develop and investigate proposals for the design of a new concept called "volatiles' distributor" that can be integrated with the fuel feed into the fuel reactor. In the project, the hydrodynamics and gas distribution of this volatiles' distributor has been investigated in an 8.5 m high cold model of a circulating fluidized bed.

First a simple basic design of the volatiles' distributor was studied, and then various improvements/modifications of the design. The results show how the volatiles' distributor provides an improved distribution of simulated volatiles and how various modifications can further improve the results so that the volatiles are distributed evenly over the cross section. The volatiles' distributor has been studied under different fluidization regimes and with different flows of simulated volatiles. The state of fluidization has also been studied with analysis of pressure and pressure fluctuations as well as filming/photography. Since the walls of the cold model are made of plexiglass, it is possible to see both what is happening in the riser and in the distributor.

The project thus shows that an volatiles' distributor can be used to achieve good contact between volatiles' and bed material/oxygen carrier. It also shows how the volatiles' distributor can be designed to get even distribution of the gas. The results from the project can be of use for all processes where good contact between bed material and volatiles' is a prerequisite for a good result. They are thus relevant for future fuel conversion processes such as chemical-looping combustion, chemical-looping gasification and thermal gasification. These processes are expected to be important for reaching future goals for climate, environment and energy supply.

Inledning/Bakgrund.

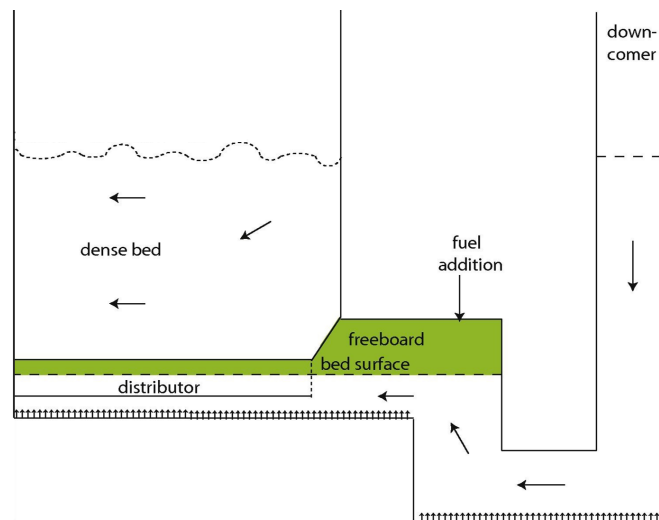
Idén bakom flyktfördelaren

Då bränsle matas in i en het fluidiserad bädd kommer det att värmas snabbt och avge brännbar gas, s.k. flykt, och denna kommer huvudsakligen att följa gasströmmen uppåt. Detta innebär dålig kontakt mellan dessa brännbara gaser och partiklarna i bottenbädden. Problemet som flyktfördelaren löser är fånga in flykten och fördela den *efter* att bränslet har tillförts. Det är ju först när bränslets kommer i kontakt med det heta bäddmaterialet som flykten frigörs.

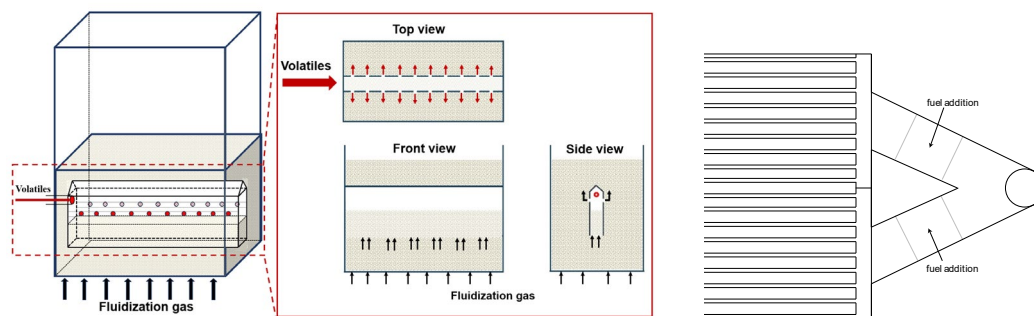
En lösning på detta är att bränslet tillförs exempelvis där bäddmaterial matas tillbaka till bädden från cyklonen, se figur 2. Flykten kommer då att ansamlas i fribordet, alltså utrymmet med gas ovanför bäddytan, och kan ledas in i flyktfördelarens armar. Det fribord där flykten samlas och är förbundet med armarnas fribord är markerat med grönt i Figur 2

En fluidiserad bädd kallas fluidiserad därför att bäddmaterialet beter sig som en vätska när det fluidiseras, alltså när gas blåses genom partikelbädden med tillräcklig hastighet. Om en upp-och-nedvänd "låda" placeras i bädden kommer den därför att fungera som en gasklocka. Den blir alltså tom och bäddnivån kommer att ställa in sig så att den är i nivå med underkanten av lådan. Om den däremot förses med hål i sidan, så kommer trycket i lådan att falla och då stiger bäddnivån inuti lådan upp till nivån där hålen är. Om gas tillförs lådan i sådan mängd att det uppstår ett tryckfall över hålen ger detta ett högre tryck i lådan och bäddnivån i lådan kommer att sjunka i motsvarande mån. En arm i en flyktfördelare fungerar som en avlång sådan låda, se Figur 3 (vänster). Flera sådana armar kan förbindas med fribordet där bränslet tillsätts, Figur 3 (höger) och 2.

Det är viktigt att fördelararmarna inte är utformade som rör, vilket skulle kunna ge igensättningar, utan att de här öppna nedåt.



Figur 2. Här visas hur flyktfördelarens armar förbinds med utrymmet där bränsle tillsätts och avger sin flykt.



Figur 3. Vänster: princip för fördelararm. Höger: fördelararmar uppifrån.

Flykttördelaren kan alltså bidra med förbättrad kontakt mellan bäddmaterial och den gas som bildas när fasta bränslen värms i processer som exempelvis kemcyklisk förbränning, kemcyklisk förgasning och termisk förgasning. Därmed kan flykttördelaren ge förbättrat utbyte i dessa processer eller minskade kostnader för efterbehandling av utgående gas. I en framtid då förbränning eller annan termisk omvandling av biomassa, liksom biogena avfall, kommer att förutsätta att koldioxid fångas in och/eller att bränslet omvandlas till drivmedel, kan detta komma att få stor betydelse.

Genomförande

Kallmodeller har framgångsrikt använts för processmodellering och uppskalning av fluidiserade bäddar. För att uppnå bästa resultat behövs det hydrodynamisk likformighet mellan en varm fullskalig enhet och en kallmodell. Detta kan uppnås genom att följa de förenklade skalningslagar som Glicksman et al. har tagit fram för snabba/cirkulerande fluidiserade bäddar.

Projektet har använt en befintlig tvådimensionell kallmodell av en cirkulerande fluidiserad bädd, se Figur 4a. Modellen är 8,5 m hög och har ett tvärsnitt på $0,7 \times 0,12$ m. Flykttördelaren, i form av en 0,7 m lång fördelararm är placerad mot framsidan som är av genomskinligt plexiglas, vilket möjliggör direkt observation i flykttördelaren. Fördelaren som alltså är nedsänkt i den täta bottenbädden, följer långsidan, och i Figur 4b visas fördelaren framifrån och i Figuren 4c visas den från kortsidan, alltså i genomskärning. HSV1-6 och LSV1-6 är de två rader med rör genomföringar från vilka gas leds till gasanalysatorn. De två blå koncentriska cirkelarna i Figur 4b visar var den simulerade flyktgasen, som innehåller 1% CO₂ som spårgas, injiceras i flykttördelaren.

I Figur 5 visar de små cirkelarna de hål där gas kommer att gå ut från flykttördelaren och till höger visas de olika fördelningar av hålen som användes i försöken. Mode 1A undersöktes i publikation 1 och jämfördes där med fallet utan flykttördelare. Mode 1B, 2A och 2B undersöktes i publikation 2. I publikation 3 försågs flykttördelaren med trekantiga bafflar i underdelen, se Figur 6, med syftet att bromsa bäddmaterialets snabba rörelser upp och ned i fördelaren.

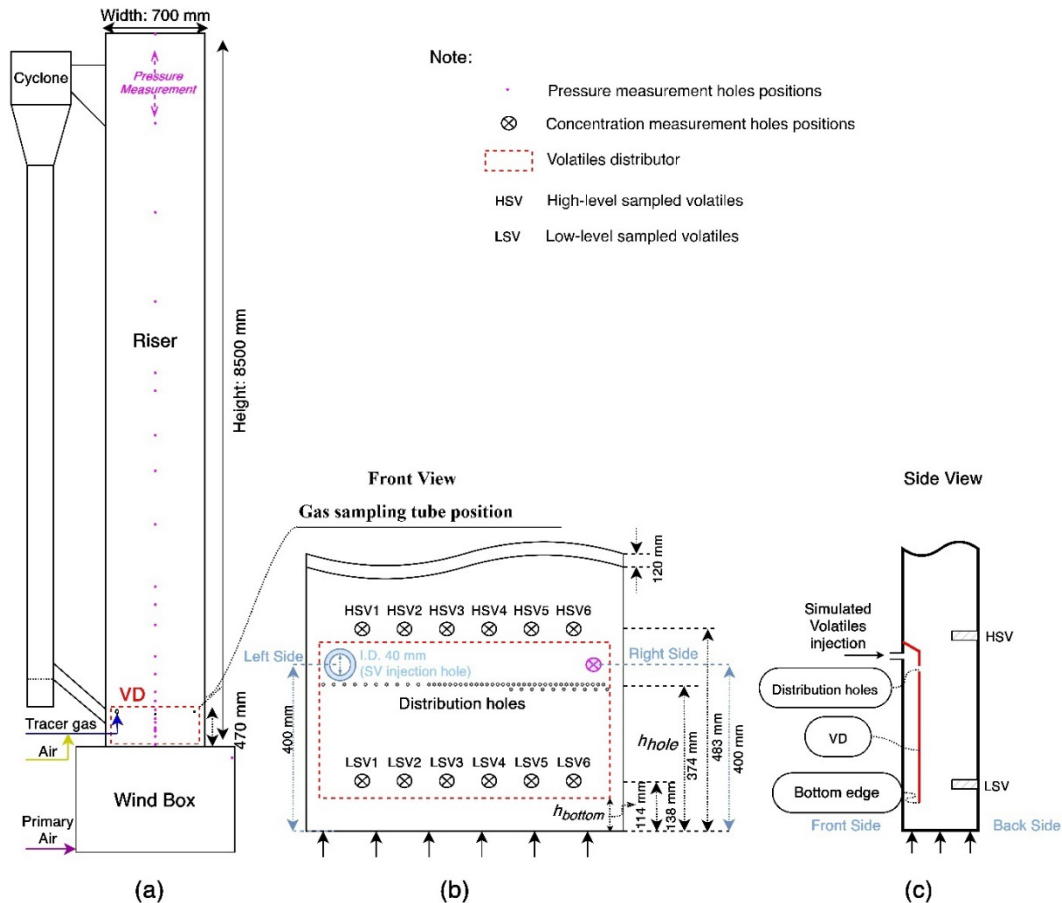
Försök med ovanstående konfigurationer utfördes med varierande gastillförsel i bottenbädden och med bottenplattor med olika tryckfall. Därmed åstadkoms olika fluidiseringsregimer. Vidare varierades flödet av simulerad flyktgas. Fluidiseringsregimen karakteriserades genom tryckfall och frekvensanalys av tryckfluktuationer.

Syftet med undersökningarna är att ge en förståelse för flykttördelarens funktion under varierande förhållanden och med olika utformning/dimensionering. Mätning av tryckfluktuationer och frekvensanalys av dessa, direkta visuella observationer, filmning med höghastighetskameror, och mätning av spårgas under varierande gasflöden och fluidiseringshastigheter har använts. Syftet var att undersöka bland annat:

- Den bäddnivå som behövs inuti fördelaren för att undvika alltför omfattande

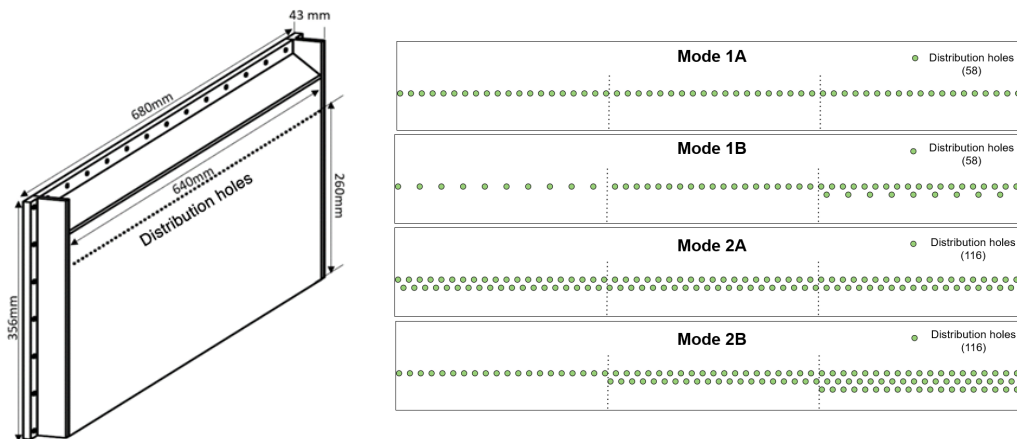
gasläckage under underkanten och hur denna beror av flödet av simulerad flykt och hålens storlek och antal.

- Hur det den erforderliga bäddhöjden inuti fördelaren beror av yttre faktorer som fluidiseringshastighet/fluidiseringsregim.
- Hur väl gasen fördelas längs distributörens längd
- Hur fördelningen av hålen påverkar funktionen

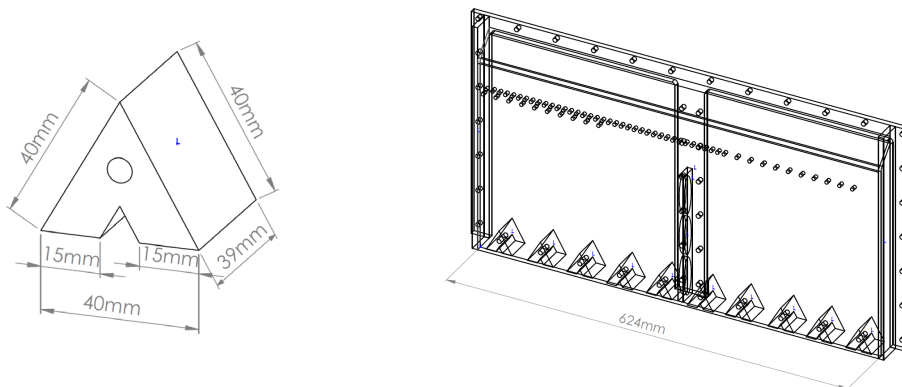


Figur 4. (a) Kallmodell av cirkulerande fluidiserad bädd utrustad med flyktfördelare och mätsystem för tryck och CO_2 -koncentration; (b) Frontvy av riserns bottendel, fördelningshålen ses i detalj i figur 5; (c) Sidovy som visar bottendelen och fördelaren i genomskärning.

Försöken visade att bäddnivån i flyktfördelaren, beroende på driftfall, kunde variera snabbt och kraftigt. Därför gjordes även försök med bafflar, se Figur 6.



Figur 5. Vänster: flyktfördelare. Höger: fördelning av hål.



Figur 6. Trekantiga bafflar med syfte att bromsa bäddrörelserna i fördelaren.

Inledningvis gjordes alltså en första design av flyktfördelare enligt Mode 1 i Figur 5, denna tillverkades och integrerades i kallmodellen. Eftersom kallmodellen är ”tvådimensionell” utgjordes flyktfördelaren av en av de flyktfördelararmar som en tänkt flyktfördelare skall bestå av. Vidare skapades möjlighet att tillsätta simulerad flyktgas i flyktfördelaren. Den simulerade flyktgasen bestod av luft och spårgas, i form av 1% koldioxid. Möjlighet att mäta fördelningen av spårgasen utefter flyktfördelararmens längd, skapades genom uttag där gas kunde extraheras och ledas till en koldioxidanalysator, HSV1-6 och LSV1-6, i Figur 4. Uttagen utgjordes av rör som sög gas inne i bädden halvvägs mellan bakväggen och flyktfördelarens vägg, se Figur 4c. Uttagen var fördelade längs flyktfördelararmen på två höjdnivåer, HSV och LSV.

Sedan tidigare fanns möjlighet att karakterisera fluidiseringsstillståndet genom tryckgivare på en rad olika nivåer, se Figur 4a och detta kompletterades med möjlighet att mäta tryck även inuti flyktfördelaren. Tryckdata samlades in med en frekvens av 50 Hz, vilket är tillräckligt för god karakterisering av fluidiseringen.

Fördelningen av den simulerade flyktgasen med hålfördelning enligt Mode 1A, Figur 5, undersöktes noggrant under olika fluidiseringsregimer och med olika flöden av flyktgas och jämfördes med motsvarande referensfall där simulerad

flyktgas injicerades utan någon flykttördelare. Resultaten publicerades i publikation 1.

Därefter gjordes försök på samma sätt med hål fördelade enligt Mode 1B, 2A och 2B, där hålen i flykttördelaren är ojämnt fördelade för Mode 1B and 2B, med syfte att ytterligare förbättra fördelningen. Resultaten publicerades i publikation 2.

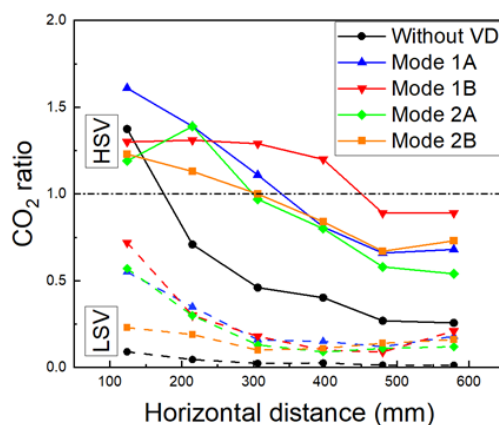
I publikation 3 försågs flykttördelaren med trianglar på insidan, Figur 6, ägnade att förhindra snabba upp- och nedgående rörelser av bäddnivån inuti fördelaren,.

Efter detta användes CFD-modellering för att undersöka flykttördelaren. Detta var ett samarbete med Wuhan University i Kina. Först validerades olika varianter av CFD-modellen med försöksresultaten ovan, publikation 4. Därefter användes CFD-modellen för att prediktera fördelningen av flyktgas, publikation 5.

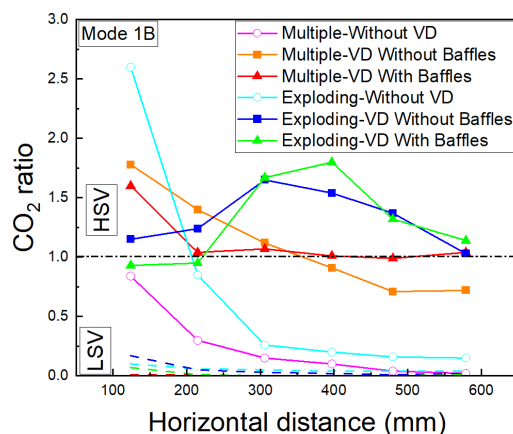
Utöver dessa fem publikationer har resultaten sammanfattats i en doktorsavhandling, publikation 6. Vidare har resultat från projektet publicerats i en lic-avhandling, publikation 7, och i två konferenspaper, publikation 8 och 9. Publikationerna 7-9 innehåller dock inte några resultat som inte finns i publikation 1-6, och har därför inte tagits med i bilagorna.

Resultat

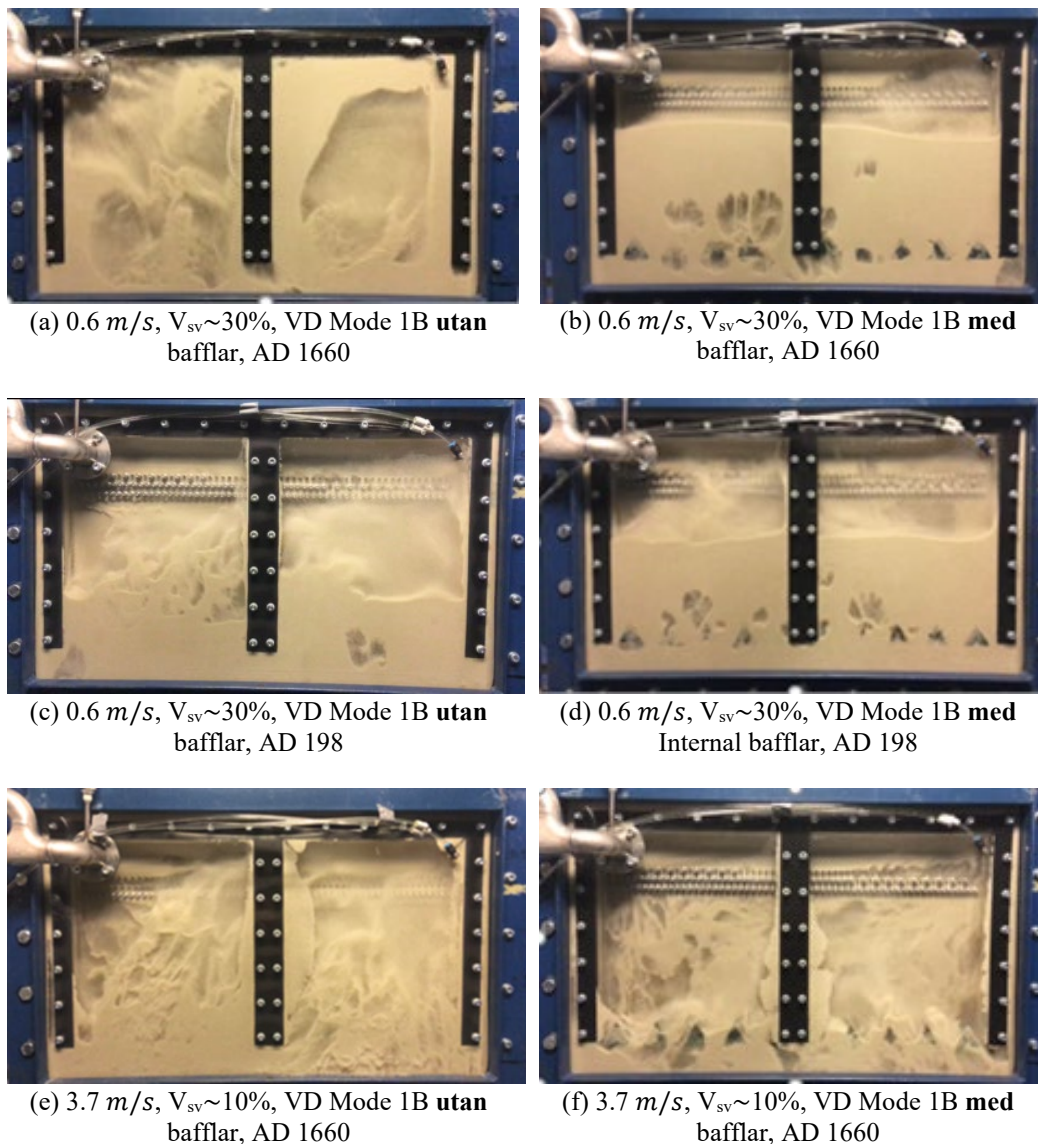
Mätresultaten visar att flykttördelaren enligt design 1A, ger väsentligt bättre fördelning av flykt. Detta visas i Figur 7 som också visar hur ytterligare förbättrad fördelning erhöles med design 1B och 2B. Exemplet i Figur 7 avser "single bubble regime". Figur 8 visar hur fördelningen förbättras av bafflar, och Figur 9 illustrerar hur bafflarna "lugnar ner" fluidiseringen inuti luftfördelaren.



Figur 7. Fördelningen av flyktiga ämnen för "single bubble regime" med och utan flykttördelare (VD).



Figur 8. Flykttördelning utan fördelare (VD), med VD och för VD med bafflar för "multiple bubble" och "exploding bubble regime"



Figur 10. Foton som visar bädden i flyktfördelaren med och utan bafflar under olika experimentella förhållanden. Med AD avses antalet hål i bottenplattan.

Resultat för olika hålfördelningar visas i Tabell 1. Tre olika mått på fördelningen presenteras här: standardavvikelse, relativ standardavvikelse och högsta delat med lägsta koncentration. Mode 1B visar bäst resultat för ”exploding bubble regime” och ”multiple bubble regime”. För ”single bubble regime” är resultaten bäst för Mode 2B bättre för låga flöden av simulerad flyktgas, medan Mode 1B visar bättre resultat för höga flöden.

I Tabell 2 visas inverkan av bafflar på fördelningen. Med undantag av ”exploding bubble regime” ger bafflarna en distinkt förbättring av fördelningen. Som framgår av Figur 8 beror detta dock på att flyktfördelaren lyckas för bra med flytta flyktgasen ifrån injektionspunkten.

Tabell 1. Resultat för olika hålfördelningar. SA: standardavvikelse, RSA: relativ standardavvikelse, H/L: högsta/lägsta koncentration.

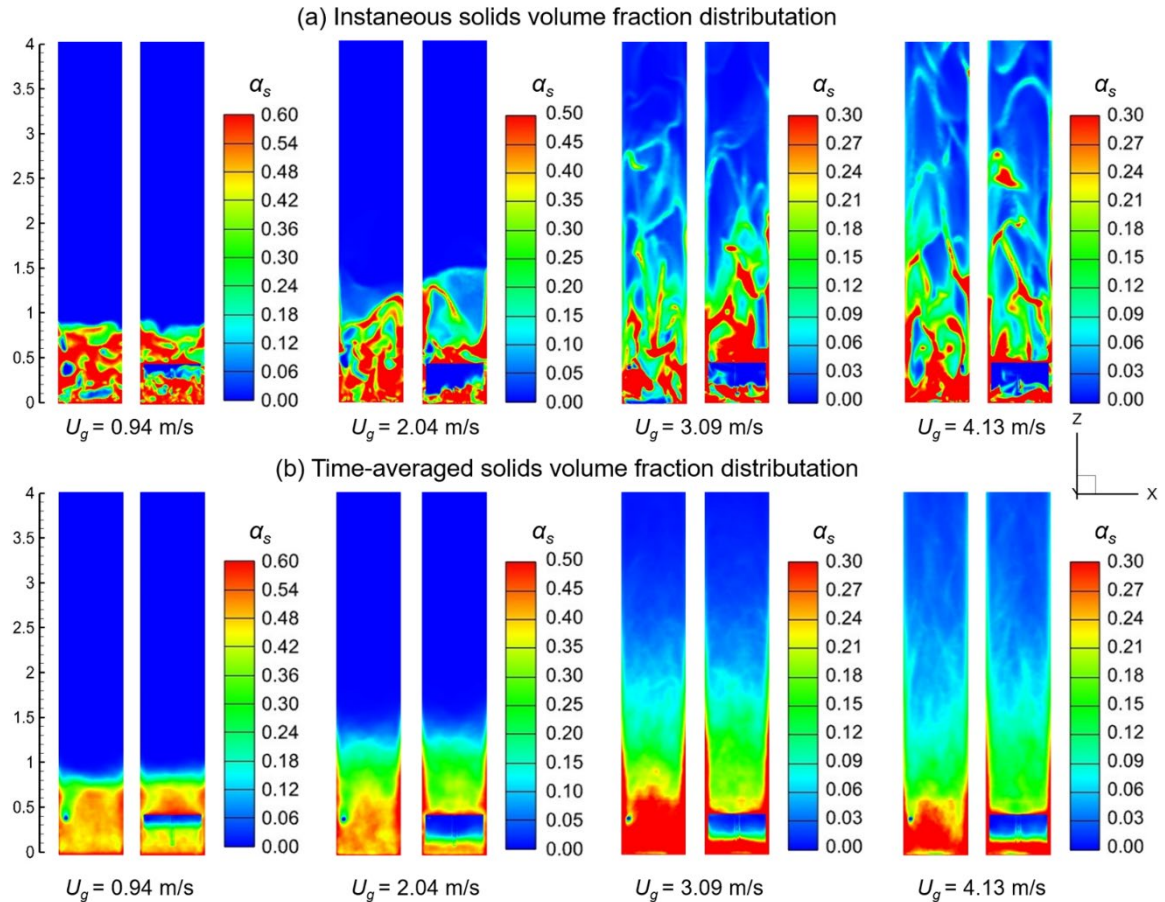
Air distributor	VD holes arrangement	Fluidization velocity/Regime u_0 [m/s]	Simulated volatiles percentage V_{sv}	Open area of the VD A [m ²]	SA	RSA	H/L
AD1660	Mode 1A	0.9/SB	7%	1.138 × 10 ⁻³	0.57	47%	3.5
			30%		0.36	36%	2.51
		3.7/EB	10%		0.25	23%	1.86
	Mode 1B	0.9/SB	10%		0.55	38%	2.69
			32%		0.18	16%	1.48
		3.7/EB	10%		0.2	16%	1.58
	Mode 2A	0.9/SB	11%	2.276 × 10 ⁻³	0.73	59%	4.86
			32%		0.48	48%	3.64
		3.7/EB	10%		0.59	45%	4.81
	Mode 2B	0.9/SB	11%		0.28	29%	2.14
			32%		0.21	22%	1.85
		3.7/EB	10%		0.31	28%	2.13
AD198	Mode 1B	0.9/MB	32%	1.138 × 10 ⁻³	0.42	36%	2.56
		0.6/MB	30%		0.39	35%	2.52
			42%		0.29	28%	2.2
	Mode 2B	0.9/MB	33%	2.276 × 10 ⁻³	0.39	42%	2.95
		0.6/MB	30%	0.53	55%	4.38	
			43%	0.36	38%	2.72	

Tabell 2. Inverkan av bafflar på fördelningen av gas.

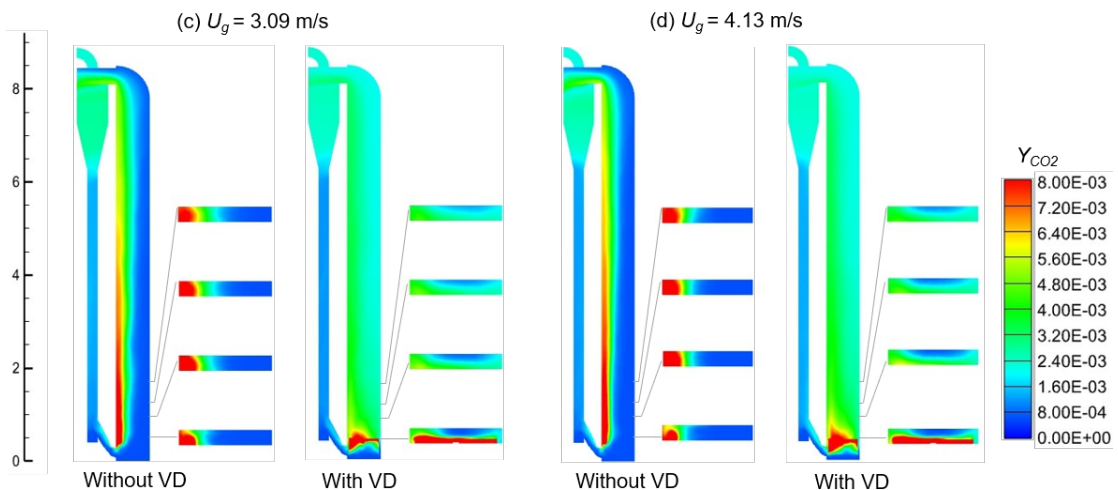
Air distributor	Fluidization velocity	Fluidization regime	Simulated volatiles percentage	SD		RSD		H/L	
	m/s			No baffles	Baffles	No baffles	Baffles	No baffles	Baffles
AD198	0.6	Multiple bubble	30%	0.38	0.21	0.35	0.19	2.52	1.61
			42%	0.29	0.12	0.29	0.11	2.20	1.39
AD1660		Single bubble	30-31%	0.41	0.19	0.34	0.16	2.30	1.55
			42%	0.23	0.18	0.22	0.15	1.80	1.51
	3.7	Exploding bubble	10%	0.21	0.34	0.16	0.26	1.60	1.95

I Figur 11 visar CFD-modelleringen hur bäddmaterialet fördelar sig med och utan flykttördelare, både momentant och som tidsmedelvärde. I de tidsmedelvärdade resultaten ser man tydligt hur bäddnivån inuti flykttördelaren sjunker när fluidiseringshastigheten, U_g , ökar. Det beror på att mer gas passerar genom hålen, vilket höjer tryckfallet.

I Figur 12 visar CFD-modelleringen hur den simulerade flykten i form av CO₂ sprider sig med och utan flykttördelare. Det framgår tydligt att utan flykttördelare rör sig flyktgasen uppåt längs vänstra väggen, medan den fördelas relativt jämnt i närvaro av flykttördelare.



Figur 11. Momentan (a) och tidsmedelvärderad (b) volymfraktion av fasta ämnen utan (vänster) och med (höger) flyktfördelare under olika driftförhållanden ((a) $U_g = 0,94$ m/s (b) $U_g = 2,04$ m/s, (c) $U_g = 3,09$ m/s, (d) $U_g = 4,13$ m/s).



Figur 12. Genomsnittlig CO_2 -koncentration utan och med fördelare (VD) under två driftförhållanden: (c) $U_g = 3,09$ m/s, (d) $U_g = 4,13$ m/s). Rektanglarna till höger om risern visar flyktgasens fördelning över fyra horisontella tvärsnitt.

Diskussion

Den globala koldioxidbudgeten för 1,5-gradersmålet är slut redan omkring 2029. Det råder inte några tvivel om att denna budget kommer att överskridas kraftigt. För att klara koldioxidbudgeten kommer det därför att krävas mycket stora minusutsläpp. De nivåer det kan röra sig om är sannolikt i storleksordningen 5-15 GtCO₂ per år under resten av detta sekel, att jämföra med nuvarande globala utsläpp på c:a 37 Gt/år.

Med hänsyn till lagringssäkerhet, potential och kostnad är bio-CCS av allt att döma den viktigaste metoden att klara dessa minusutsläpp. Hur stora minusutsläpp som man kan få med bio-CCS är omdiskuterat. Men redan nu är uttaget av biomassa från skogs- och jordbruk mycket stort, motsvarande 22 GtCO₂/år eller 32 GtCO₂/år om man även räknar in det som lämnas kvar på åkrar och i skogen. En del av uttaget är mat/foder och här återförs CO₂ till atmosfären genom respiration, c:a 5.5 Gt/år. Återstoden hamnar i olika avfallsströmmar, rökgaser eller binds i produkter som förr eller senare blir avfall. Hur mycket av detta som går att använda för minusutsläpp är oklart. Det är också oklart hur mycket uttaget går att öka och hur mycket det faktiskt kommer att öka. Uttaget på 22/32 GtCO₂ kan jämföras med de 450 GtCO₂ som binds varje år genom fotosyntesen. Av detta är ungefär hälften ovan jord.

Med tanke på de gigantiska minusutsläpp som krävs, är det utomordentligt viktigt att få fram teknik som effektivt och till rimliga kostnader fångar koldioxid från omvandling av biomassa. Även om kostnaden för CCS med hänsyn till nödvändigheten att klara klimatkrisen, utan tvekan är rimlig, så är den likväl betydande. Aker Energi erbjuder CCS till fast pris i vår del av Europa, infångning, transport och lagring ingår, och totala kostnaden är 70-150 €/ton CO₂ beroende på lokala förhållanden.[1] Härav är infångning 40-90 €/ton CO₂, och den lägre delen av intervallet gäller om det finns spillvärme så att energikostnaden blir noll. Själva koldioxidinfångningen kostar alltså runt 90 €/ton. Om exempelvis 10 Gt CO₂ skall fångas in per år så motsvarar kostnaden för enbart infångningen mer än 1000 kr/capita globalt, eller 0,5% av dagens globala BNP. Om denna kostnad kan sänkas väsentligt motsvarar alltså den potentiella besparingen flera promille av dagens globala BNP.

Den teknik för koldioxidinfångning som är bäst etablerad är MEA-processen, alltså absorption av koldioxid med MEA (monoetalamin) som patenterades 1930 och användes i stor skala på kolkraftverk för mer än 40 år sedan i Texas. En stor del av forskningen på CCS fokuserar på MEA och liknande absorptionsmedel, men tekniken är mogen och grundproblemet kvarstår. Den anläggning som krävs för infångningen kostar mycket pengar, och även absorptionsmedlet har betydande kostnader. Till detta kommer att regenereringen av absorptionsmedlet som slukar stora mängder värme, ungefär 40% av bränslets värmevärde!

Det finns ett mycket stort antal metoder att fånga in koldioxid som bygger på olika varianter av gasseparation. Men gemensamt för alla dessa är de stora kostnaderna och energiåtgången för att infångningen.

Här är kemcyklisk förbränning en unik process, som undviker problemet genom att inte blanda förbränningsluft och bränsle och processen kan därför fånga in koldioxid utan dyr och energikrävande gasseparation.

Eftersom kemcyklisk förbränning inte ännu har kommersialiserats så finns det i nuläget inga säkra siffror på kostnaden. Litteratordata ligger normalt på en kostnad runt 20-30 €/ton, alltså $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{3}$ till kostnaden av MEA-infångning. En färsk beräkning kommer från EU-Kina-projektet Cheers, där det franska oljebolaget Total uppskattat merkostnaden för kemcyklisk förbränning till 18.6 €/ton CO₂. [2]

Den uppenbara extrakostnaden för en CLC-reaktor jämfört med en CFB, Figur 1b, är bränslereaktorn som består av okylda väggar, eftersom all värme tas ut i luftreaktorn och från gaserna som lämnar systemet. Luftreaktorn är i sig en CFB och kan användas som en sådan och är därmed inte någon egentlig merkostnad. Kostnaden för okyld, välisolerad, 40 cm tjock, pannvägg är i storleksordningen 2 000 €/m² och om man inkluderar efterbrännkammare för oxy-polishing behövs kanske 1500 m² för en anläggning på 200 MW_{th}, vilket ger en merkostnad av 3 M€, eller 0.3 M€/år med 10 års avskrivning. En sådan anläggning skulle fånga in 0.4 Mt CO₂/år, vilket alltså motsvarar en kostnad av knappt 1 €/ton CO₂! Detta är en förstås förenklad beräkning som inte tar hänsyn till engineering costs, större pannhus osv., men kan ändå illustrera potentialen för CLC.

En stor kostnad som inte kan undvikas är kompression av CO₂, vilket ju behöver göras oavsett hur koldioxiden fångas in. Dessutom behövs en rening av koldioxiden, vilket kan göras med destillation i samband med kompressionen. En annan kostnad är oxy-polishing, vilket innebär att syre tillsätts till gasen från bränslereaktorn för att förbränna rester av icke omvandlad brännbar gas i en efterbrännkammare. Detta kräver då en mängd syre som bestäms av det som kallas oxygen demand, som är kvoten mellan den mängd syre som behövs i oxy-polishingsteget och den totala mängd syre som behövs för att förbränna bränslet. Lite förenklat kan man säga att om oxygen demand är 10%, så har man med kemcyklisk förbränning minskat behovet av gasseparation med en faktor 10.

Att kemcyklisk förbränning fungerar har demonstrerats i uppemot 50 pilotanläggningar med en total drifterfarenhet av >12 000 h. Anläggningarna är mellan 300 W och några MW. Hur långt ifrån kommersialisering är då kemcyklisk förbränning? Normalt skalas teknik upp steg för steg tills man når full skala. Nästa logiska steg skulle då vara kanske 20-30 MW_{th}. Men det är ganska uppenbart att bygget av en anläggning i denna skala, tillsammans med kringssystem, utbildning av driftpersonal osv. i slutändan skulle kosta betydligt mer att bygga och driva, jämfört med merkostnaden för att bygga en fungerande CFB-panna som är integrerad med en bränslereaktor enl. Figur 1b. Det är också högst osäkert om ett sådant mellansteg skulle ge svar på några väsentliga frågor. Därför är det svårt att motivera en förlust i tid och pengar på en mellanstor

anläggning, som inte skulle ha något kommersiellt värde, utan det finns goda skäl att gå direkt till fullskala.

Hur långt har då tekniken kommit? Biobränsle har använts i piloter i Sverige, Finland, Norge, Spanien, liksom i Österrike, där man i en 80 kW-anläggning nått mer än 90% gasomvandling med biomassa, alltså mindre än 10% oxygen demand [3]. Ännu mera intressanta är resultaten från en 40 m hög kinesisk pilotanläggning, Figur 13, som nyligen kört mer än 60 h vid 6 MW, med hög omvandling, oxygen demand var under 2,5% [4].



Figur 13. 6 MW CLC-pilot i Kina.

Publikationslista

- 1) Xiaoyun Li, Anders Lyngfelt, Tobias Mattisson.
An experimental study of a volatiles distributor for solid fuels chemical-looping combustion process (2021)
Fuel Processing Technology, 220, 106898

- 2) Xiaoyun Li, Anders Lyngfelt, David Pallarès, Carl Linderholm, Tobias Mattisson.
Investigation on the Performance of Volatile Distributors with Different Configurations under Different Fluidization Regimes (2022)
Energy & Fuels, 36, 17, 9571-9587
- 3) Xiaoyun Li, Anders Lyngfelt, Carl Linderholm, Bo Leckner, Tobias Mattisson.
Performance of a volatiles distributor equipped with internal baffles under different fluidization regimes (2022)
Powder Technology, 409, 117807
- 4) Xiaobao Wang, Xiaoyun Li, Lan Yi, Anders Lyngfelt, Tobias Mattisson, Xiaoqin Wu, Hao Luo, Qingang Xiong.
CFD modeling of a fluidized bed with volatiles distributor for biomass chemical looping combustion (2024)
Chemical Engineering Science, 295, 120211
- 5) Xiaobao Wang, Xiaoyun Li, Lan Yi, Anders Lyngfelt, Tobias Mattisson, Xiaoqin Wu, Qingang Xiong, Hao Luo.
Numerical Evaluation and Optimization of Volatiles Distributors with Different Configurations for Biomass Chemical Looping Combustion
Accepted for publication in *Chemical Engineering Journal*
- 6) Xiaoyun Li
Improved Fuel Conversion in Chemical Looping Combustion using Novel Volatiles Distributors and Effective Manganese-based Oxygen Carriers,
Doktorsavhandling, Inst f Rymd- geo- och miljövetenskap Avd f Energiteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg 2024
- 7) Xiaoyun Li
Experimental study of a Volatiles Distributor for Improving the Cross-sectional Gas Distribution in Fluidized Beds
Licentiate Thesis, Dept. of Energy and Environment, Division of Energy Technology, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2020.
- 8) Xiaoyun Li, Anders Lyngfelt, Carl Linderholm and Tobias Mattisson,
A Volatiles Distributor for Improving the Cross-Sectional Gas Distribution in Fluidized Beds,
Fluidized Bed Conversion Conference (FBC24), Gothenburg, May 8-11, 2022
- 9) Xiaoyun Li, Anders Lyngfelt, Carl Linderholm, Tobias Mattisson,
Experimental Study of a Volatiles Distributor for Chemical Looping Combustion of Solid Fuels,
6th International Conference on Chemical Looping (CLC6), 19-22 September 2022, Zaragoza, Spain

Referenser, källor

1. Anon., *Making CCS Investable*. Carbon Capture Journal, 2023. **91**, Jan/Feb p. 6-7.
2. Gouraud, V. *CLC technology benchmark TEA: Techno Economic Assessment, Presentation*. Cheers project webinar, September 19-21, 2023; Available from: <https://www.youtube.com/@cheerseuclc4606>.
3. Fleiß, B., et al., *Holistic assessment of oxygen carriers for chemical looping combustion based on laboratory experiments and validation in 80 kW pilot plant*. Fuel Processing Technology, 2022. **231**: p. 107249.
4. Zhenshan, L. *The dynamic system research team has made significant progress in the research of chemical looping combustion technology (translated from Chinese)*. Web page. Release time March 27. 2024; Available from: <https://www.te.tsinghua.edu.cn/info/1095/3291.htm>.

Bilagor

- 1) Xiaoyun Li, Anders Lyngfelt, Tobias Mattisson.
An experimental study of a volatiles distributor for solid fuels chemical-looping combustion process (2021)
Fuel Processing Technology, 220, 106898
- 2) Xiaoyun Li, Anders Lyngfelt, David Pallarès, Carl Linderholm, Tobias Mattisson.
Investigation on the Performance of Volatile Distributors with Different Configurations under Different Fluidization Regimes (2022)
Energy & Fuels, 36, 17, 9571-9587
- 3) Xiaoyun Li, Anders Lyngfelt, Carl Linderholm, Bo Leckner, Tobias Mattisson.
Performance of a volatiles distributor equipped with internal baffles under different fluidization regimes (2022)
Powder Technology, 409, 117807
- 4) Xiaobao Wang, Xiaoyun Li, Lan Yi, Anders Lyngfelt, Tobias Mattisson, Xiaoqin Wu, Hao Luo, Qingang Xiong.
CFD modeling of a fluidized bed with volatiles distributor for biomass chemical looping combustion (2024)
Chemical Engineering Science, 295, 120211
- 5) Xiaobao Wang, Xiaoyun Li, Lan Yi, Anders Lyngfelt, Tobias Mattisson, Xiaoqin Wu, Qingang Xiong, Hao Luo.
Numerical Evaluation and Optimization of Volatiles Distributors with Different Configurations for Biomass Chemical Looping Combustion
Accepted for publication in *Chemical Engineering Journal*
- 6) Xiaoyun Li

Improved Fuel Conversion in Chemical Looping Combustion using Novel Volatiles Distributors and Effective Manganese-based Oxygen Carriers,
Doktorsavhandling, Inst f Rymd- geo- och miljövetenskap Avd f Energiteknik,
Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg 2024