

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Innovativ och energieffektiv bio-koldioxidinfångning ifrån förbränningsavgaser	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Innovative and energy efficient Bio carbon capture from exhaust streams	
Universitet/högskola/företag Grimaldi Development AB/KTH	Avdelning/institution Inst för Kemiteknik/Avd. för Processteknologi
Adress Box 1134, 131 26 Nacka Strand	
Namn på projektledare Carl Häggmark	
Namn på ev övriga projektdeltagare Christophe Duwig, Lars Pettersson, Shareq Mohd Nazir, Henrik Kusar, Aijuan Wang, Ali Najarnezhadmashhadi, Claes Inge, Dan Karlsson, Peter Franzén.	
Nyckelord: 5-7 st BECCS, klimatmål, koldioxidinfångning, CCS, spraytorn, centrifugalseparator, spraydroppar	

Förord

Detta projekt har genomförts av Grimaldi Development AB tillsammans med Institutionen för kemiteknik vid Avdelningen för Processteknologi vid KTH:s skola för Kemi, bioteknologi och hälsa. Arbetet har bedrivits av en projektgrupp med professorer, postdoc-forskare och utvecklingsingenjörer hos Grimaldi Development, se ovan, med Grimaldi Development som koordinator.

Studien har finansierats av Energimyndigheten och Grimaldi Development AB.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	2
Summary	3
Inledning/Bakgrund	3
Genomförande	6
Laboratorieförsök med spraydroppar i gasström	6
Numeriska simuleringar av koldioxidabsorption i spraydroppar	7
Processimulering av BECCS-processen	7
Resultat	7
Design och uppbyggnad av experimentell utrustning vid KTH	7
Spray- och separeringsförsök i testriggar	9
Resultat med olika absorptionskemikalier relevanta för BECCS-processen.	12
Resultat numeriska simuleringar av koldioxidabsorption i spraydroppar och processimulering	12
Undersökning av CO ₂ -absorption i en droppe.	12
Simulering av gasabsorption i ett vertikalt absorptionsrör	15
Resultat av processimulering av BECCS-processen med droppspraytorn	17
Diskussion.....	18
Publikationslista.....	18
Referenser, källor.....	19
Bilagor	20
Vetenskapliga konferensbidrag och inskickade artikelmanus	20

Sammanfattning

BECCS vinner intresse inom industrin för att möjliggöra koldioxidneutral drift. Sverige har goda förutsättningar för att anta BECCS och potentialen är att fånga över 30 MTCO₂ / år som räknas som negativa utsläpp. Det är en viktig milstolpe mot ett klimatneutralt samhälle. Tekniken som används för BECCS är etablerad och tillgänglig. Ändå är det kostsamt och innovationer förväntas påskynda implementeringen av nya BECCS-funktioner. I detta projekt har en ny och innovativ lösning för koldioxidavskiljning konstruerats och testas i laboriemiljö. Innovationen använder en centrifugalseparator (väl etablerad inom rening av vevhusgasventilation på fordon) tillsammans med sprayteknik för att ta bort droppar av vätskeabsorbent med absorberad koldioxid.

Flera laborietestriggar har byggts och experiment har genomförts för att i detalj studera och utveckla konceptet, varvid samtliga uppställda tekniska och akademiska mål för projektet har kunnat uppfyllas inom ramen för projekttiden, sedan ett nytt slutdatum för projektet beviljats.

Projektet har visat att innovationen möjliggör lägre kostnader för koldioxidinfångning ifrån utsläppskällor med förbränningsavgaser. Laborierresultat indikerar kostnadsbesparingar motsvarande CAPEX -30% & OPEX -40% jämfört med bästa tillgängliga teknik. Nästa steg i utvecklandet av tekniken består i att ta fram en mobil testanläggning och med denna undersöka

koldioxidinfångning av ett delflöde av industriella rökgaser från ett kraftvärmeverk.

Summary

BECCS is gaining interest in industry for enabling carbon neutral operation. Sweden is well placed for adopting BECCS and the potential is of capturing over 30 MTCO₂/year that are counted as negative emissions. It is an important milestone towards a climate neutral society. The technology used for BECCS is established and available. Yet, it is costly and innovation is expected to accelerate the deployment of new BECCS capabilities. In this project, a new and innovative solution for carbon dioxide separation has been designed and tested in a laboratory environment. The innovation uses a centrifugal separator (well established in the purification of crankcase gas ventilation on vehicles) together with spray technology to remove droplets of liquid absorbent with absorbed carbon dioxide.

Several laboratory test rigs have been built and experiments have been carried out to study and develop the concept in detail, whereby all technical and academic goals set for the project have been reached within the project time, after an extension of the end date of the project was approved.

The project has shown that the innovative concept studied enables lower costs for carbon dioxide capture from emission sources with combustion exhaust gases. Laboratory results indicate cost savings equivalent to CAPEX -30% & OPEX -40% compared to best available technology. The next step in the development of the technology consists in developing and using a mobile test facility to investigate carbon dioxide separation of a partial stream of industrial flue gases from a heat and power plant.

Inledning/Bakgrund

Sverige har åtagit sig att nå verkligt nollutsläpp av växthusgaser till 2045 och uppnå negativa utsläpp åren efter. Bland de åtgärder som finns tillgängliga för att nå dessa mål är en användning av biobränslen avgörande [1]. Till exempel använder värme- och kraftindustrin en stor mängd avfall från skogsindustrin. Vissa andra industrier går dock inte lika snabbt framåt och kommer att förbli nettoutsläppare av koldioxid. Att nå 2045-målet skulle innebära att dessa utsläpp kompenseras med negativa utsläpp. Användningen av biomassa för bränning tillsammans med Carbon Capture and Sequestration (CCS) [1,2] erbjuder denna potential och kallas bio-CCS eller BECCS.

En nyligen publicerad utredningsrapport [2] föreslår en strategi och ett genomförande av åtgärder för att etablera och påskynda användningen av BECCS i Sverige med mål att fånga 3,7 MTCO₂/år till 2030 och 10,7 MTCO₂/år till 2045. Detta dokument granskar också olika tekniska lösningar. Med fokus på befintliga industriella anläggningar (från massa och papper och värme- och kraftproduktion), är CO₂-avskiljning efter förbränning en attraktiv lösning som

kan läggas till befintliga anläggningar. I Sverige släpps cirka 30 MTCO₂/år ut från förbränning av biomassa enbart från pappers- och värme- och kraftindustrin (endast de 38 största anläggningarna medräknade) [3]. Därför är potentialen mycket stark att bli världsledande inom negativa utsläpp genom att använda BECCS efter förbränning med befintliga industrier.

För att gå vidare förväntas reglerande och skattemässiga åtgärder fortsätta [2] för att göra installationen av BECCS-lösningar livskraftig – med andra ord täcka merkostnaden på 30-40 €/TCO₂ för fångst och 17-20 €/TCO₂ för transport [4]. Parallellt bör innovation göra det möjligt att sänka dessa priser på BECCS-systemen och ytterligare påskynda utbyggnaden av BECCS.

Principen för BECCS-processen ligger i separeringen av den gasformiga koldioxiden i avgaserna med hjälp av en tvättlösning (absorptionsvätska) för selektiv absorption [5]. Detta steg utförs ofta vid förhöjt tryck och lägre temperatur. Absorbenten regenereras i ett separat steg där koldioxid frigörs när trycket sänks och temperaturen höjs. Tan et al. [5] granskade de olika faktorer (trycknivåer, temperaturnivåer, val av absorbent, design av absorptionskolonnen, ...) som påverkar enhetens prestanda och kostnad. De största kostnaderna för utrustning (CAPEX) är kompressorer och absorptionskolonner, medan driftskostnaderna (OPEX) domineras av värme-/kylbehov och kompressionsarbete. Värme-/kylbehovet beräknas till cirka 5 GJ/TCO₂ [6] och kan reduceras till 1,8 GJ/TCO₂ med byte för icke-konventionell absorbentlösning [6]. Exempel på attraktiva lösningar inkluderar en blandning av kända CO₂-absorberande lösningar som kombinerar CaCO₃ och aminer [7-8] vilket ger betydande kostnadsminskningar.

Innovativa lösningar förväntas därför utmana designen av dessa enheter och ge nya lösningar som minskar OPEX och CAPEX för optimal integration i de olika anläggningarna. I en granskning av nuvarande pilot- och demonstrationsanläggningar för CCS efter förbränning, formulerade Idem et al. [6] utmaningen som att "framtida trender kan se betydligt mindre reaktionskärl och värmebehov för tekniker med CO₂-avskiljning efter förbränning ifrån rökgaser som använder reaktiva lösningsmedel. Dessa skulle leda till en avsevärd sänkning av kostnaden för koldioxidinfångning efter förbränning".

Det aktuella projektet tar upp innovativa lösningar för att minska storleken på reaktionskärlet och minska värmebehovet som behövs för driften.

Grimaldi Development AB (GDEV), tidigare 3nine, har utvecklat ett nytt koncept med skrubberteknik i kombination med centrifugalseparering för marin avgasrening. Syftet är att spraya mindre alkalidroppar för att absorbera svaveloxiderna i avgaserna. Mindre droppar innebär en större total yta för absorption av SO₂. Mindre droppar innebär också att avståndet för diffusion inuti dropparna blir kortare för SO₂, Na⁺ och OH⁻ molekyler och jonpartiklar. Vidare innebär mindre droppar ett kortare avstånd för SO₂ att diffundera i avgaserna (kortare avstånd mellan dropparna). Effekten blir en snabbare kemisk reaktion. Dessutom producerar 3nine centrifugalsepareringsutrustning för effektiv

rengöring av oljedimma i verkstäder och vevhusgaser i fordon. Detta är en beprövad teknik med förutsägbart separeringsresultat för en känd partikelstorleksfördelning, som användes för att separera de svavelhaltiga dropparna i gasreningssystemet.

I GDEV:s nya innovativa BECCS-metod planeras spraytorn användas i kombination med centrifugalseparering för att fånga upp och separera ut spraydroppar med absorberad koldioxidgas. Systemet kan utformas i modulära parallella enheter för ökad skalbarhet, flexibilitet, servicebarhet och ökad drifttid. Till skillnad från ledande konventionell koldioxidinfångningsteknik (packed bed absorption towers) medför användandet av spraydroppar med absorptionsvätska reaktioner från avgaserna från alla håll samtidigt. Den ökade sfäriska reaktionsarean för dropparna, per volymsenhet absorptionsvätska, innebär en högre absorptionsreaktionshastighet och ett högre kapacitetsutnyttjande av absorptionsvätskan. Det senare minskar mängden absorptionsvätska och därmed mängden värme som behövs för behandling, hantering och regenerering av lösningsmedlet. På grund av de stora volymflödena av rökgas från värmekraftverk måste absorptionsvätskan regenereras för att få en kontinuerlig process. Den stora ytan hos mikrodropparna minskar avsevärt storleken på infångningssystemet.

Projektet syftar till att ta denna teknik – redan beprövad inom vevhusgasventilering och inom marin avgasrening – och anpassa den för energieffektiv BECCS.

De specifika tekniska målen för projektet, vilka alla har nåtts, har varit:

- att genom laboratoriestudier med hög noggrannhet kunna simulera absorptionen av koldioxid från droppar och efterföljande gas/droppseparation för ett brett spektrum av absorptions- och driftsförhållanden.
- att utföra experiment i laboratorieskala med detaljerade analysinstrument för validering av absorptionsprocesssimuleringarna
- att testa den innovativa lösningen innehållande en spray- och separatorenhet i en liten pilotskala i Grimaldi Developments utvecklingslaboratorium.
- att utveckla verktyg för kostnadsuppskattning och optimering för den nya enheten i en traditionell BeCCS-process.

De akademiska målen för projektet, vilka alla har nåtts, har varit:

- att anställa två post-doc forskare inom projektet med fokus på numeriska simuleringar och experimentella absorptionsstudier.
- att presentera projektets vetenskapliga resultat i en artikel i en peer-reviewed vetenskaplig tidskrift.
- att presentera vetenskapliga resultat från projektet vid en internationell vetenskaplig konferens - dels muntligen, dels i ett publicerat konferensbidrag.

Samtliga ovanstående projektmål för projektet, såväl tekniska som akademiska, har uppfyllts inom ramen för projekttiden, sedan ett nytt slutdatum för projektet beviljats.

Genomförande

I detta projekt har en innovativ metod för koldioxidinfångning utvecklats. Arbetet har bedrivits inom definierade arbetspaket. Det nya konceptet har studerats experimentellt genom laborieförsök och i numeriska simuleringar av gasabsorption i spraydroppar i gasströmmar som innehåller koldioxid. Det nya konceptet har även modellerats i en matematisk processanalys i en kemisk processsimuleringsprogramvara.

Laborieförsök med spraydroppar i gasström

Laborieexperiment har genomförts vid KTH, Stockholm, och vid GDEVs utvecklingslab i Nacka Strand. Flera olika testuppställningar och testriggar har konstruerats och byggts upp för att kunna studera olika aspekter av gasskrubning med absorptionsvätska i form av spraydroppar som introduceras i gasströmmen genom spraymunstycken. Sensorer och mätsystem har byggts upp för att under kontrollerade förhållanden mäta koldioxidhalten i gasen och i absorptionsvätskan. Experiment har sedan utförts efter att en noggrann riskanalys och säkerhetsgenomgång genomförts, under ledning av KTH, för att säkerställa en korrekt hantering av kemikalier.

Strömningen och massöverföringen mellan koldioxid och vätskedroppar i en gasström är en komplex process. Försök har genomförts där inverkan av olika parametrar och förhållanden på upptaget av koldioxid undersökts. Testgasen i dessa försök har varit luft eller kvävgas som blandats med koldioxid från gastuber i kända volymkoncentrationer. Olika absorptionskemikalier har studerats. De faktorer som undersökts för processen har varit:

- Inverkan av varierande förhållande mellan gasflödets storlek och vätskeflödets storlek (L/G-förhållande).
- Inverkan av gas- och vätsketemperatur.
- Inverkan av koncentration på absorptionsvätskan
- Inverkan av kollisioner mellan vätskedroppar
- Inverkan av väggförluster av sprayvätska

Avgörande för hur systemets funktionssätt och effektivitet är utformningen av spraysystemet som genererar små vätskedroppar av absorptionsvätska i gasströmmen. Flera experiment har därtill genomförts i projektet där olika typer av spraymunstycken och dysor utprovats och studerats vid olika driftförhållanden, såsom vid sprayning medströms och motströms gasflödet. Andra aspekter på spraysystemet har också beaktats vid testerna, såsom

munstycksplacering, antal munstycken, spraymönster och sprayvinklar, droppstorlekar och fördelning, inverkan av avdunstning, vätskans ytspänning och munstyckstryck.

Numeriska simuleringar av koldioxidabsorption i spraydroppar

KTH har genomfört numeriska simuleringar av koldioxidabsorption i spraydroppar. En modell har skapats genom att använda förenklade antaganden om processen för att kunna göra beräkningar av koldioxidinfångning i en vätskedroppe.

Publicerade vetenskapliga studier av den detaljerade mekanismen för CO₂-absorptionsprocessen av kemiska lösningsmedel är fortfarande begränsad. Det är känt att den fysiska överföringen och kemiska reaktionen mellan gas och en droppe är grunden i absorptionsprocessen. Därför är detaljerad kunskap om droppabsorption av betydelse för modelleringen av absorptionsprocessen [9]. Simulering av CO₂-absorption av en enda droppe bör därför ge en mer exakt förståelse av de processer som är involverade, vilket öppnar för optimering av absorptionsprocessen. Monoetanolamin (MEA) är ett lösningsmedel som används vid kemisk absorption, särskilt för att fånga upp CO₂ i rökgaser från kraftverk och inom industri [10]. Detta är en kemikalie som använts för jämförelser i detta arbete.

Processimulering av BECCS-processen

I samarbete med KTH har processimuleringar av BECCS-processen utförts där inverkan av det nya spraybaserade avskiljningskonceptet med ett spraytorn studerats i en simuleringsmodell i Aspen Plus.

Resultat

I detta avsnitt presenteras och sammanfattas resultaten från projektets olika arbetspaket.

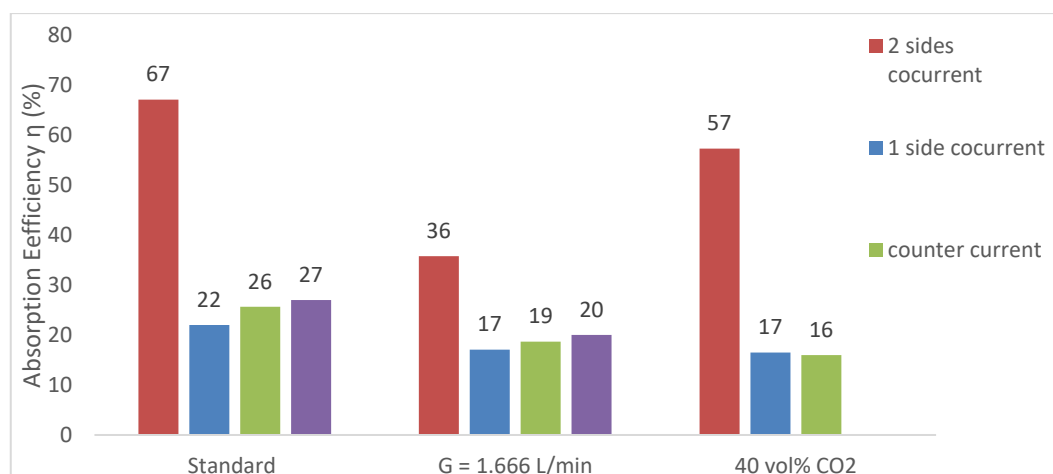
Design och uppbyggnad av experimentell utrustning vid KTH

En experimentell rigg designades och konstruerades noggrant från grunden med huvudsyftet att undersöka effektiviteten av koldioxidinfångning. Med en spraytornskonfiguration arbetade en postdoktor från Institutionen för kemiteknik vid KTH, Kungliga Tekniska Högskolan. Till en början utvecklades en glasabsorptionskammare för att studera dynamiken hos små aerosoler och deras interaktioner med gasflödet. Detta arbete ledde till konstruktionen av ett större spraytorn i PVC för visuell observation och optimering av munstycksplaceringen. Den slutliga versionen i rostfritt stål inorporerade lärdomar från tidigare försök, vilket förbättrade hållbarheten och korrosionsmotståndet. En bild av den labbskaleuppställning som användes i projektet visas i Figur 1.



Figur 1. Absorptionsutrustning konstruerad av rostfritt stål. Glasabsorptionskammaren syns i mitten av bilden.

Resultat från 45 olika laboratorieexperiment vid KTH redovisas nedan. Först presenteras och diskuteras allmänna resultat som är tillämpliga på alla experiment. Därefter presenteras analyser av prestanda för CO₂-infångning i spraytornet för varje flödeskonfiguration. Figur 2 illustrerar systemets prestanda med fyra flödeskonfigurationer under fyra olika förhållanden: det standardmässiga, ett med ökad gasflödeshastighet, ett med ökad CO₂-koncentration i gasen och ett utan uppvärmning av vätskelösningen. Undantaget är motströmsflödeskonfigurationstester med gasfördelning, där vi endast undersökte det standardmässiga tillståndet och tillståndet med ökad gasflödeshastighet.



Figur 2: Jämförelse av absorptionseffektivitet för tre flödeskonfigurationer under olika driftsförhållanden.

Effekten av gasflödes hastigheter, CO₂- och K₂CO₃-koncentrationer, temperatur och mängden vätskelösningsmedel utvärderades också i varje flödeskonfiguration. En ökning av gasflödes hastigheten kan förkorta den tid gasen stannar i spraytornet, vilket leder till en kortare kontaktperiod mellan gas och vätska. Som ett resultat påverkas absorptionseffektiviteten negativt. På samma sätt, med ett ökad L/G-förhållande finns mer K₂CO₃ tillgängligt för mängden CO₂ i systemet, vilket ökar dess kapacitet att absorbera CO₂. Dessutom förbättrar en högre koncentration av K₂CO₃ vanligtvis systemets förmåga att absorbera CO₂. Detta kan dock påverka munstycket negativt och spraykonfigurationen på grund av ökad viskositet och densitet hos vätskan, tillsammans med skapandet av större droppar.

Vid höga CO₂-koncentrationer (i vårt system nära 40%), tenderar infångningseffektiviteten att minska. Minskningen i effektivitet förklaras av den snabba uttömningen av absorbenten, kaliumkarbonat i detta fall, när mer CO₂ är närvarande. Mer specifikt töms K₂CO₃ snabbt nära insidan av dropparnas yta på grund av CO₂-absorption från den CO₂-rika gasen. När CO₂-koncentrationen är låg är tillräckligt med K₂CO₃ tillgängligt för att reagera med CO₂, vilket leder till hög infångningseffektivitet. Dock, med högre CO₂-koncentrationer, är den tillgängliga kaliumkarbonaten otillräcklig för att reagera med all CO₂, vilket resulterar i en lägre infångningseffektivitet. Vidare börjar absorptionsprocessen från dropparnas ytterlager och rör sig inåt. Vid höga CO₂-koncentrationer konsumeras karbonationerna i det yttre lagret snabbare. När processen når de inre lagren av droppen har mycket av koldioxiden redan passerat, vilket leder till en mindre effektiv infångning.

Konfigurationen med strömmande gas från två sidor visade sig vara den mest effektiva av de fyra studerade konfigurationerna. Att använda två gasmunstycken, placerade på motsatta sidor av kolonnväggen och nära munstycket, visade sig vara mer effektivt i vårt system, främjade turbulens för bättre blandning och säkerställde god kontakt mellan gas och vätska. Med gasmunstycken på båda sidor och vätska som kommer ovanifrån, finns bättre kontakt mellan gas och vätska, jämnare fördelning och mer turbulens. Dessa faktorer i kombination skapar ett flöde med fler virvlar, vilket ökar effektiviteten av CO₂-infångningen.

Spray- och separeringsförsök i testriggar

Ett flertal försök har genomförts i labmiljö hos KTH och Grimaldi Development där olika spraymunstycken testats. Spraymunstyckena har varit av hydraulisk typ för atomisering av absorptionsvätskan. Strömningen av spraydroppar i ett gasflöde bestående av luft och inblandad koldioxidgas har studerats i ett transparent rör.

En testuppställning vid GDEV:s lab i Nacka Strand, har omfattat ett horisontellt inloppsrör och centrifugalseparator (Figur 3).

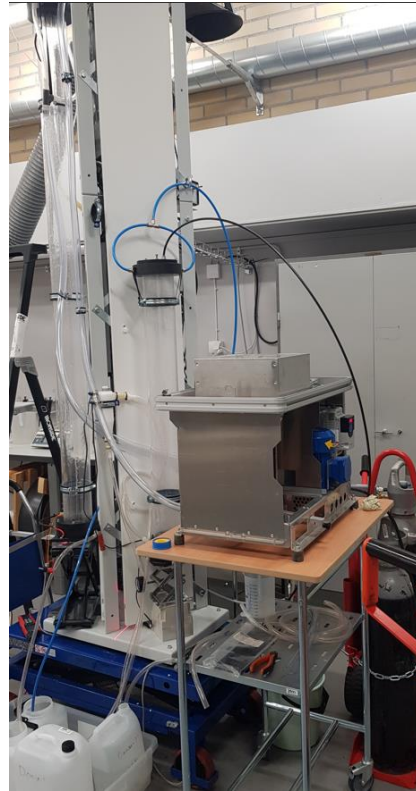
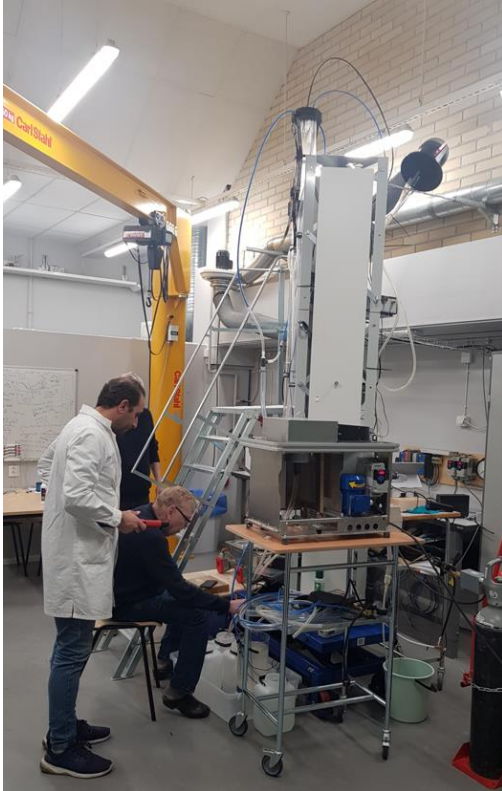
En annan testuppställning vid GDEV:s lab i Nacka Strand har omfattat ett vertikalt monterat spraykammarrör med gasinflöde i botten och gasutflöde i toppen (Figur 4). Dessa båda uppställningar har utformats för kontinuerlig drift, där ny gas introduceras i inloppet, och där utloppsgasen, som renats från

koldioxid, ventilerats ut till atmosfären utanför labbyggnaden. Absorptionsvätska har samtidigt tillförts och även recirkulerats.

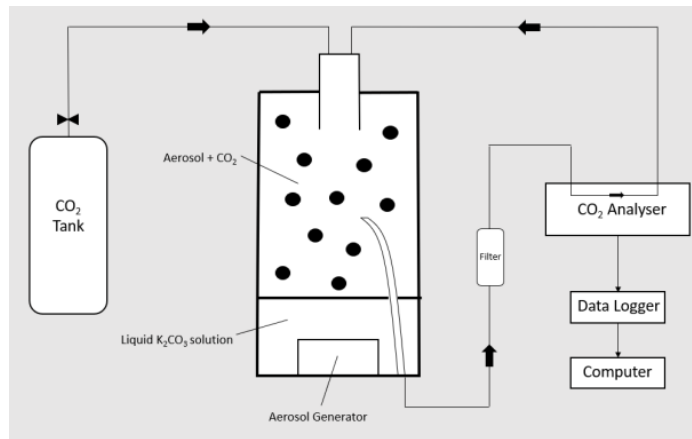
Ytterligare en annan testuppställning har omfattat en spraykammare med en volym absorptionsvätska i botten (Figur 5). I denna vätskevolym har en nedsänkt droppgenerator placerats. I denna testuppställning har olika satsvisa absorptionsexperiment utförts, varvid halten av koldioxid i kammaren har monitorerats efter att droppgenerering påbörjats.



Figur 3. Försöksrigg för spray- och separeringstester i GDEV:s utvecklingslab.



Figur 4. Spraytorsupställning i GDEV:s utvecklingslab.



Figur 5. Laborarieuppställning för satsvisa absorptionsexperiment.

Resultaten av dessa spray- och absorptionsförsök med koldioxidgas sammanfattas nedan.

- För att sprayen ska vara effektiv måste hela spraykammarens (rörets) tvärsnitt fyllas.
- Med sprayriktningen medströms gasflödet dröjer det innan sprayen är fullt utbildad så att den fyller ut hela tvärsnittet. Detta gäller vid högre gasflödes hastigheter.
- Vid sprayning såväl motströms som motströms gasflödesriktningen vid lägre gasflödes hastigheter i ett smalt rör kan en väsentlig andel av vätskedropparna träffa rörväggen. Absorptionen av koldioxid fortsätter men blir inte lika effektiv som för dropparna i gasen.
- Den tid som dropparna vistas i absorptionsröret, innan de eventuellt träffar rörväggen eller botten av reaktionskammaren, eller transporteras med gasen vidare till centrifugalseparatorn, är en avgörande faktor för hur mycket koldioxid som hinner absorberas i dropparna.
- Dropparnas storlek är en annan avgörande faktor som påverkar upptaget av koldioxidgas. En halverad droppdiameter för en given volym absorptionsvätska medför en dubbling av dropparean som exponeras och tillgängliggörs för reaktionen med omgivande koldioxidgas.

Resultat med olika absorptionskemikalier relevanta för BECCS-processen

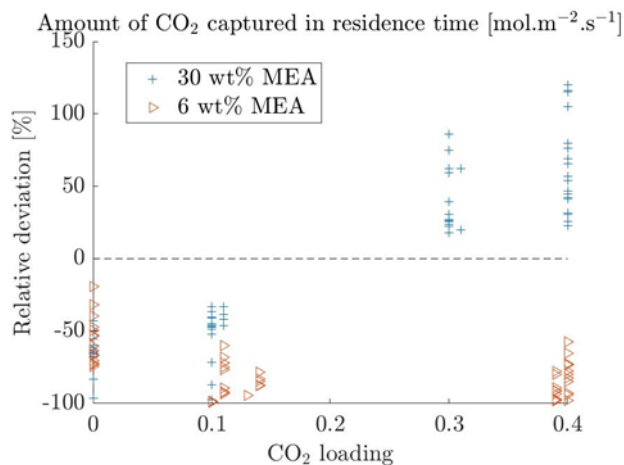
Undersökningar har genomförts med olika basiska absorptionskemikalier som blandats in i absorptionsvätskan, som huvudsakligen består av vatten. Labresultat har visat att den hastighet med vilken koldioxidgas upptas i vätskedropparna varierar för olika absorptionskemikalier, i överensstämmelse med tidigare forskningsresultat. Tester i en försöksupställning med satsvisa absorptionsexperiment gav ett långsammare gasupptag för droppar med kaliumkarbonat jämfört med natriumhydroxidlösningar, men även jämfört med monoetanolamin (MEA) som studerades i numeriska experiment. Detta kunde bekräftas för spraydroppar vid atmosfärstryck och rumstemperatur.

Resultat numeriska simuleringar av koldioxidabsorption i spraydroppar och processimulering

Undersökning av CO₂-absorption i en droppe.

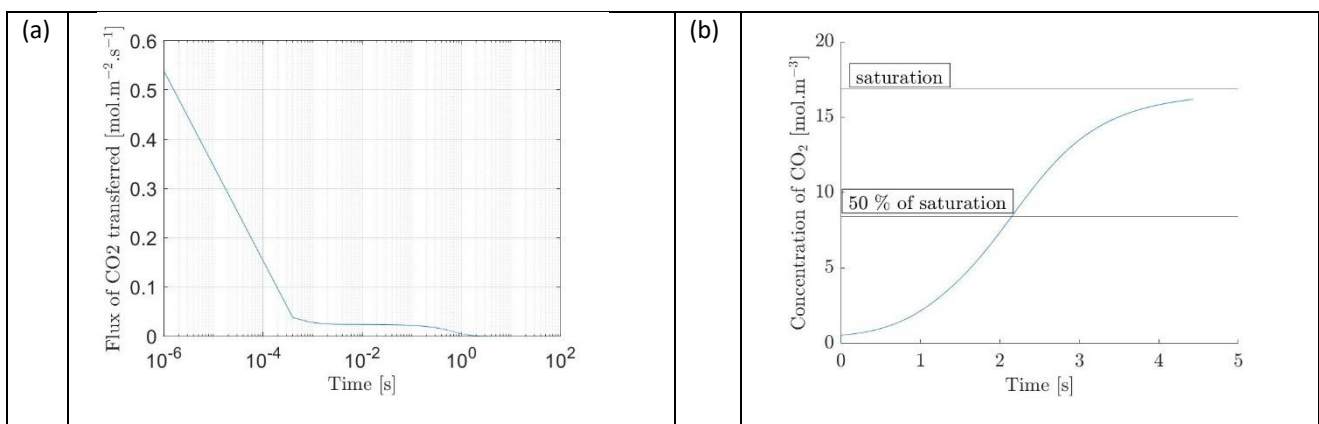
Med MATLAB-kod har ett prediktivt verktyg utvecklats för att simulera och förstå den reaktiva absorptionen av CO₂ av en enda icke-rörlig droppe i ett obegränsat stagnerat gasflöde. Den implementerade modellen är baserad på Whitmans tvåfilmsteori som tar hänsyn till kemiska reaktioner inuti droppen och gas-vätskemassöverföring över gränssytan, för att bestämma mängden CO₂ som kan fångas per droppe under en given tid. De termodynamiska egenskaperna och

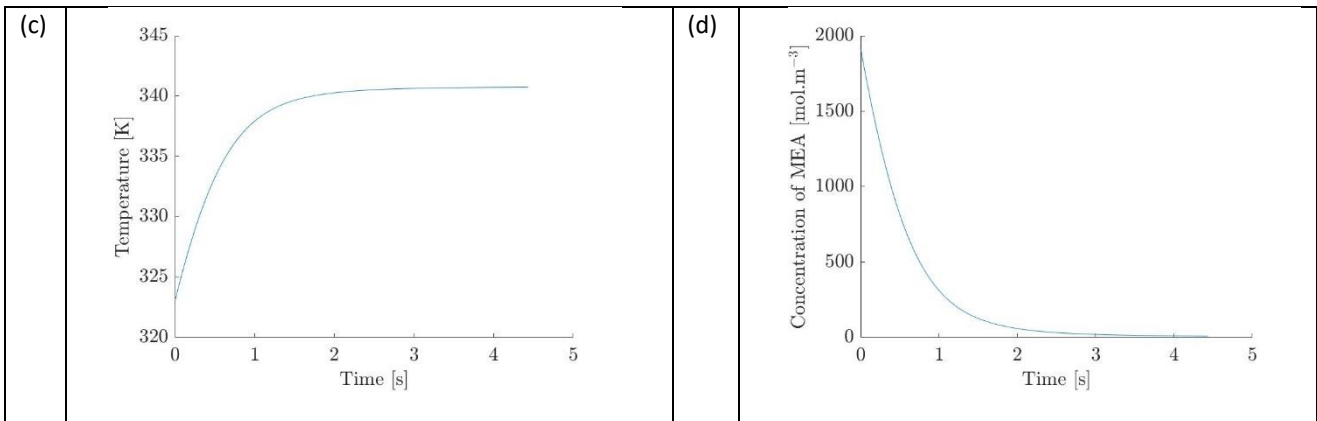
transportegenskaperna hos vätske- och gasfaser beroende på temperatur och sammansättning hämtas från öppna publikationer och validerades med experimentella data. Eftersom CO₂ interagerar med lösningsmedlet förväntas jämvikten mellan ånga och vätska avvika från Henrys lag. Ändå är VLE modellerad av Henrys lag för enkelhetens skull. Monoetanolamin (MEA) har använts i stor utsträckning vid kemisk absorption, särskilt för att fånga upp CO₂ i rökgaser från kraftvärmeverk. Således är MEA vald som absorbent i detta arbete. Den kemiska reaktionen i det ternära {MEA-H₂O-CO₂}-systemet anses vara en termolekulär reaktionsmekanism.



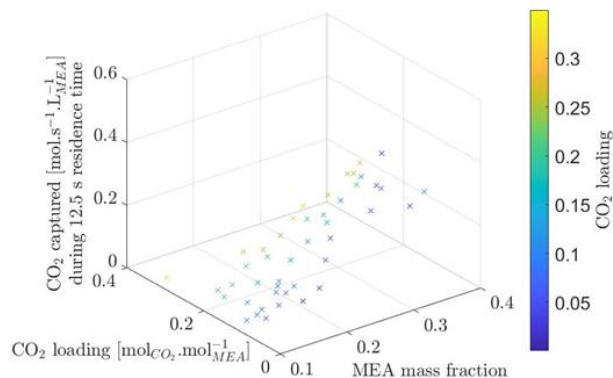
Figur 6. Relativ avvikelse avseende CO₂-belastning: modellens resultat jämförs med experimentella data av Luo et al.[11]

Modellen validerades av experimentella data i den tidigare studien (Ref. Figur 6). CO₂-absorptionsprocessen av en enda droppe MEA undersöktes genom att följa tidsutvecklingen av vissa indikatorer.





Figur 7 Tidsutveckling i ett typiskt fall av indikatorer: (a) CO₂-överförd flux (log skala); (b) Koncentration av CO₂. (c) Temperatur; (d) Koncentration av MEA



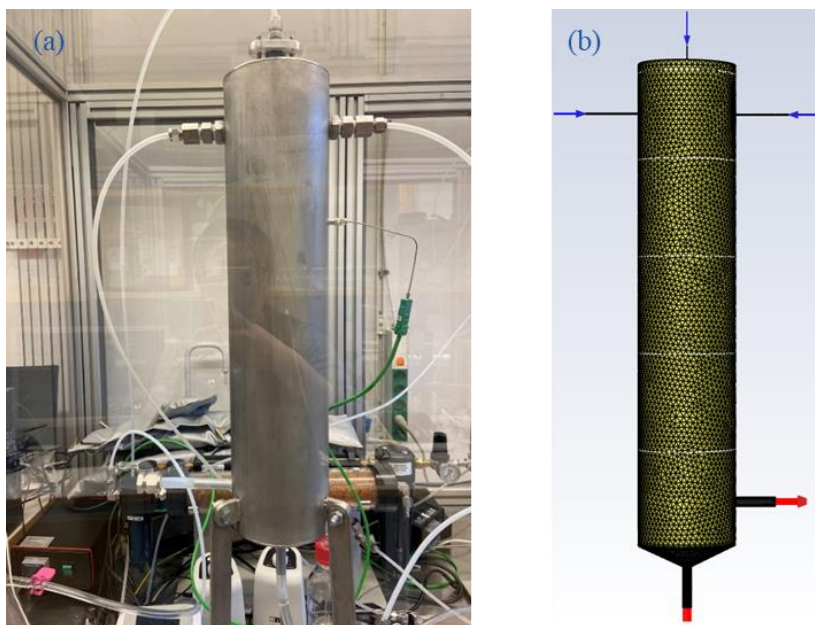
Figur 8. Koldioxidinfångning vid en uppehållstid på 12,5 s med CO₂-laddning och MEA-massfraktion.

6 stycken olika parametrars inverkan på CO₂-fångningsprestanda undersöktes: MEA-massfraktion i lösningsmedlet, initial CO₂-laddning, temperatur, tryck, koncentrationen av CO₂ i gasfasen och droppdiameter. MEA-massfraktion och initial CO₂-belastning har en stor inverkan på CO₂-avskiljningsprestanda inom den studerade domänen. Som förväntat är mängden CO₂ som fångas upp maximal när mängden fritt MEA är maximal, d.v.s. vid hög MEA-massfraktion och låg CO₂-belastning. Närmare bestämt uppnås den maximala CO₂ som fångas upp (0,51, 12,5 s uppehållstid) för en vattenlösning med 26,5 viktprocent MEA och initial CO₂-belastning på 0,02.

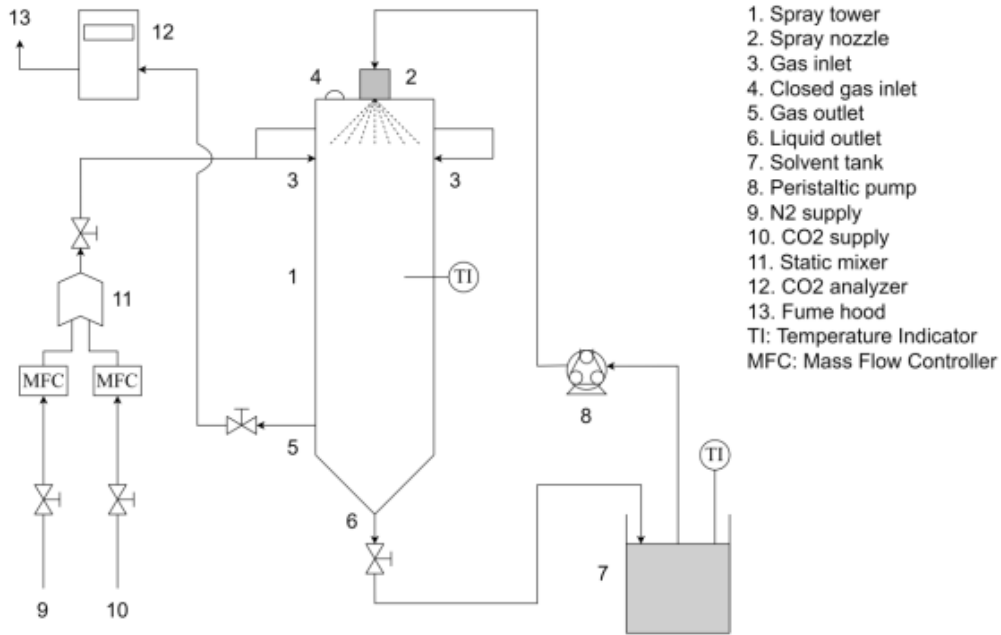
Det snabba verktyget gör det möjligt för en att bläddra i hela designutrymmet och variera driftstrycket, temperaturen och sammansättningen av avgaserna. Den kan fungera som en enkel men exakt reducerad ordningsmodell (ROM) som ska användas i design och systemstudie/kostnadsuppskattning.

Simulering av gasabsorption i ett vertikalt absorptionsrör

Vi betraktade avgasflödet i ett vertikalt rör med den absorberande vätskan sprutad längs flödet. Det är ett typiskt tvåfasflöde som består av kontinuerlig rökgas och dispergerade vätskedroppar. Rökgasen behandlas som ett kontinuum, beskrivet av Eulerian-metoden, medan den statistiska Lagrangian-metoden används för droppspårning i rörflödet. ROM från WP1 användes för att beskriva värme- och massöverföringen från/till droppen, vilket realiserats via användardefinierade funktioner (UDF) kopplade till CFD-koden. Därför utförs stadiga simuleringar med ANSYS Fluent2021-koden som innehåller den egenutvecklade UDF:en i ett läge med dubbel precision. Den experimentella uppställningen och CFD-beräkningsdomänen visas i figur 9.

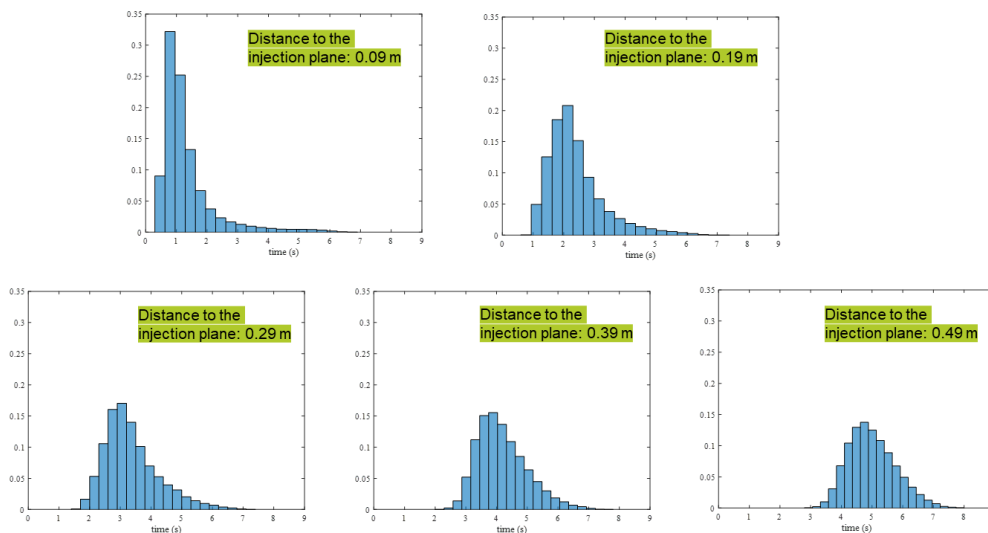


Figur 9. (a) Experimentell uppställning, KTH, CO₂-absorption av vätskedroppar KTH; (b) Beräkningsdomänen i CFD-modellen.



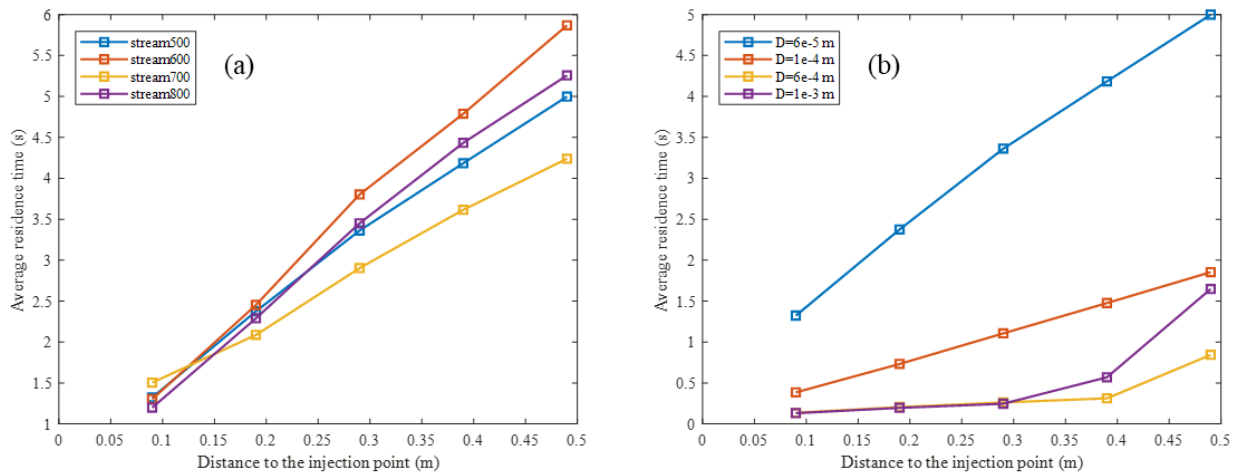
Figur 9. c) Schematiskt diagram över den experimentell uppställningen vid KTH.

Den statistiska ensemblen av droppar ges av partikeluppehållstidsfördelningen längs absorptionsröret, vilken visas i figur 10. Partikeluppehållstiden tenderar att vara normalfördelning vid botten av absorptionsröret.



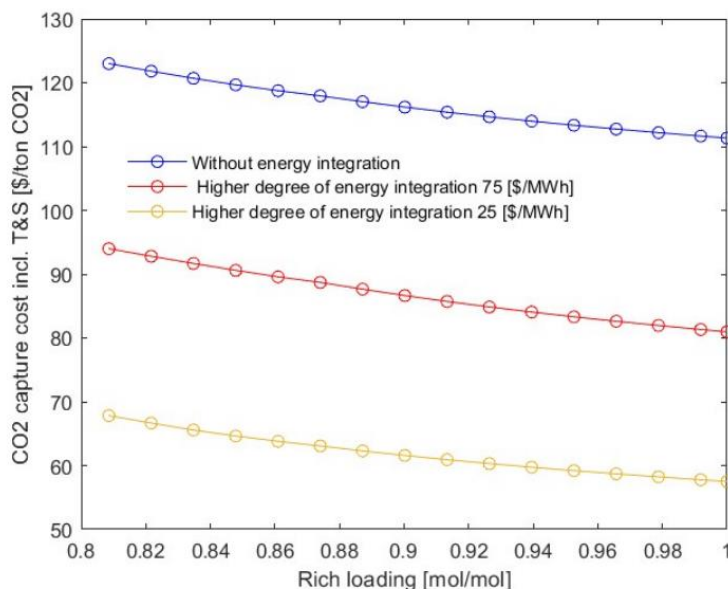
Figur 10. Uppehållstidsfördelning i absorptionsröret vid olika avstånd till injektionsplanet.

Simuleringsmodellen matar in partikelparametrarna (partikelantal, partikeldiameter) och utgående partikeluppehållstid som funktion av avståndet från vätskemunstycket. Det kan ses från figur 11 att beräkningsfallet stream500 kan skapa tillräckligt med partiklar och producera ett stadigt resultat. Ökande partikeldiameter kan avsevärt minska partikeluppehållstiden.



Figur 11. Genomsnittlig uppehållstid som funktion av avståndet till injektionspunkten för olika antal partiklar (a) och partikeldiametrar (b).

Resultat av processimulering av BECCS-processen med droppspraytorn



Figur 12. Simulerad infångningskostnad för koldioxidinfångning medelst Aspen Plus och BECCS som kaliumkarbonat som absorptionskemikalie.

Grafen i figur 12 visar vad kostnaden skulle ha varit om en energioptimering med droppspraytorn gjordes i anläggningen. Fångstkostnaden skulle ha reducerats med cirka 30 \$/ton jämfört med fångstkostnaden för referens utan optimering. Detaljer återfinns i examensarbetet "Process and techno-economic analysis of a compact CO₂ capture technology" av Nestor Salvador Palacios, KTH, July 2023.

Diskussion

Detta projekt är det första steget i att skapa tekniska lösningar och utbilda experter för att designa framtida energieffektiva och prisvärda BeCCS-system. I nästa steg planerar vi att utforma och bygga en mobil forskningsanläggning för kolloxidinfångning på industriella rökgaser vid ett kraftvärmeverk. Det är starten på en utvecklingsprocess för att ta innovationen till användning under verkliga industriella förhållanden. Resultaten från denna studie har lagt grunden för en industriellt anpassad designmetodik, som utgör en stark bas för att fullborda innovationsstadiet och ta tekniken vidare till kommersialisering.

Publikationslista

Konferensbidrag och muntlig presentation av forskningsresultat:

Wang, A., Oudin-Dubois, A., Najarnezhadmashhadi, A., Inge, C., Häggmark, C., Duwig, C., Numerical simulation of CO₂ absorption by a single droplet with amine-based solvent, 16th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-16, October 23-2, 2022, Lyon, France.

Artikel med forskningsresultat inskickad för publicering i vetenskaplig tidskrift med förhandsgranskning av experter (peer-review):

Najarnezhadmashhadi, A., Das Neves, N., Yorllet Toala Escobar, K., Häggmark, C., Karlsson, D., Franzén, P., Duwig, C., Kusar, H., Enhancing CO₂ Capture Efficiency in Spray Towers: An Experimental Study on Flow 3 Configurations using Potassium Carbonate, International Journal of Greenhouse Gas Control, JGGC_D-24_00130, 2024.

Examensarbeten utförda tillsammans med KTH inom projektets ämnesområde (ingen finansiering från projektet):

Carbon dioxide capturing using aerosol technology, Pierre Meus, KTH, June 8, 2023.

Carbon Dioxide Capture: A Performance Analysis of Spray Towers, Kimberly Yorllet Toala Escobar, KTH, June 2023.

Performance analysis of a spray tower for compact CO₂ capture under various flow conditions, Noé Das Neves, KTH, August 2023.

Process and techno-economic analysis of a compact CO₂ capture technology, Nestor Salvador Palacios, KTH, July 2023.

Referenser, källor

- [1] Biogena koldioxidutsläpp och klimatpåverkan, Naturvårdsverket, <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Klimat/Tre-satt-att-berakna-klimatpaverkande-utslapp/Biogena-koldioxidutslapp-och-klimatpaverkan/>
- [2] Vägen till en klimatpositiv framtid, Statens Offentliga Utredningar, SOU 2020:4, <https://www.regeringen.se/48ec20/contentassets/1c43bca1d0e74d44af84a0e2387bfbcc/vagen-till-en-klimatpositiv-2020soutiv-2020soutiv-2020>
- [3] Stor potential för bio-CCS i Sverige – 38 orter med bäst förutsättningar, Bioenergi, april 2019 <https://www.svebio.se/press/pressmeddelanden/stor-potential-for-bio-ccs-i-sverige-38-orter-med-bast-forutsattningar/>
- [4] Skagestad et al., Carbon Capture and Storage (CCS) i industrisektorer – fokus på nordiska länder, Energy Procedia 63 (2014) 6611 – 6622
- [5] Tan et al, Faktorer som påverkar CO₂-absorptionseffektiviteten i packad kolumn: A review, Journal of Industrial and Engineering Chemistry 18 (2012) 1874–1883
- [6] Idem et al., Praktisk erfarenhet av avskiljning av CO₂ efter förbränning med användning av reaktiva lösningsmedel i stora pilot- och demonstrationsanläggningar, International Journal of Greenhouse Gas Control 40 (2015) 6–25
- [7] Shi et al., CO₂-absorptionseffektivitet för olika MEA-DEA-blandningar med hjälp av CaCO₃ och MgCO₃ i en batch och semi-batch processer, Separation and Purification Technology 220 (2019) 102–113
- [8] Zhang et al., Analys av minskningen av energikostnaden genom att använda MEA-MDEA-PZ lösningsmedel för post-combustion carbon dioxide capture (PCC), Applied Energy 205 (2017) 1002–1011.
- [9] Chen W-H, Tsai M-H, Hung C-I. Numerisk prediktering av CO₂-avskiljningsprocessen med en enda droppe i alkalisk spray. Tillämpad energi 2013;109:125–34. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.082>.
- [10] Karunarathne SS, Eimer DA, Øi LE. Fysiska egenskaper hos MEA + vatten + CO₂-blandningar i CO₂-fångning efter förbränning: En genomgång av korrelationer och experimentella studier. Journal of Engineering 2020;2020:17. <https://doi.org/10.1155/2020/7051368>.
- [11] Luo X, Hartono A, Hussain S, Svendsen HF. Mass transfer and kinetics of carbon dioxide absorption into loaded aqueous monoethanolamine solutions.

Chemical Engineering Science 2015;123:57–69.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.10.013>.

Bilagor

Vetenskapliga konferensbidrag och inskickade artikelmanus

Wang, A., Oudin-Dubois, A., Najarnezhadmashhadi, A., Inge, C., Häggmark, C., Duwig, C., Numerical simulation of CO₂ absorption by a single droplet with amine-based solvent, 16th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-16, October 23-2, 2022, Lyon, France.

Najarnezhadmashhadi, A., Das Neves, N., Yorllet Toala Escobar, K., Häggmark, C., Karlsson, D., Franzén, P., Duwig, C., Kusar, H., Enhancing CO₂ Capture Efficiency in Spray Towers: An Experimental Study on Flow 3 Configurations using Potassium Carbonate, International Journal of Greenhouse Gas Control, JGGC_D-24_00130, 2024.