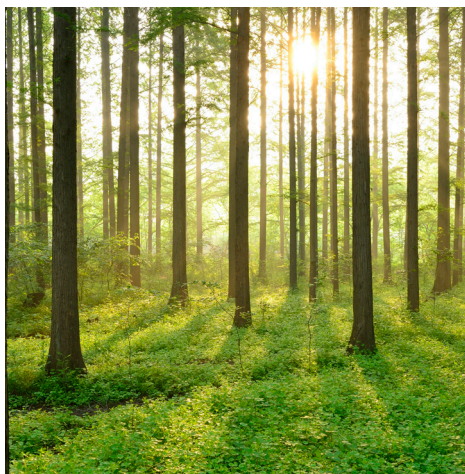


CCU INOM FJÄRRVÄRMESEKTORN

RAPPORT 2022:841



BIO-CCS I FJÄRRVÄRMESEKTORN



CCU inom Fjärrvärmesektorn

Kunskapsöversikt

ANTON FAGERSTRÖM
THEO NYBERG

ISBN 978-91-7673-841-2 | © Energiforsk januari 2021

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Negativa utsläpp kommer sannolikt att krävas för att för att Sverige ska kunna uppnå sina klimatmål. Det här projektet har utrett möjligheterna för fjärrvärmebranschen att bidra med negativa utsläpp genom avskiljning, transport och lagring av biogen koldioxid från kraft- och fjärrvärmeanläggningar inklusive avfallsförbränningsanläggningar.

Uppvärmningssektorn har som vision att år 2045 vara en kolsänka som hjälper till att minska de totala svenska växthusgasutsläppen. Inom sektorn finns stor potential för bio-CCS eftersom en betydande andel av Sveriges biogena utsläpp kan härledas till punktutsläpp inom sektorn. Men för att realisera potentialen och uppvärmningssektorns vision om att bli en kolsänka krävs konkreta insatser.

Målet med projektet har varit att ta fram ett kunskapsunderlag som visar hur fjärrvärmesektorn kan bli en kolsänka till år 2045 genom avskiljning och lagring av biogen koldioxid från förbränning av biobränslen och avfall. Underlaget har legat till grund för fjärrvärmesektorns arbete med att utveckla en strategi för bio-CCS vid kraft- och värmeproduktion inklusive förbränning av avfall.

Projektet ger konkret vägledning till fjärrvärmeföretagen när det gäller implementering av bio-CCS. I arbetet har ingått att visa på robusta utvecklingsvägar för utbyggnaden av bio-CCS och hur bio-CCS från år 2030 kan drivas på affärsmässiga grunder. Arbetet har omfattat sex arbetspaket samt en sammanfattande syntes kring ekonomi, teknik, infrastruktur, policy, regelverk och hållbarhetsaspekter för storskalig introduktion och användning av bio-CCS i fjärrvärmebranschen. En mindre kunskapssammanställning kring CCU har också genomförts inom projektet.

Energiforsk har varit värd för projektet som har letts av Jenny Gode (Profu) och utförts av ett 20-tal forskare och experter från Profu, IVL Svenska Miljöinstitutet, Chalmers Tekniska Högskola, Linköpings Universitet och RISE. Projektet har utförts i nära samverkan med fjärrvärmebranschen, avfallsbranschen, myndigheter och andra aktörer längs värdekedjan för bio-CCS.

Energiforsk vill rikta ett tack till medverkande forskare och företag som bidragit med stor kunskap och stort engagemang under projektet. Sammantaget har över 100 personer från mer än 40 olika organisationer bidragit till projektets genomförande. Energiforsk vill också rikta ett särskilt tack till Energimyndigheten, deltagande företag och organisationer som har finansierat projektet.

Energiforsk

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Projektet är primärt baserat på tillgänglig litteratur samt tidigare publicerat och icke-publicerat material. Detta underlag har kompletterats med ett mindre antal intervjuer. Projektet är en mindre kartlägningsstudie av det aktuella kunskapsläget och användning av CCU (Carbon Capture and Utilization, Sv.: Koldioxidinfångning och användning) i fjärrvärmesektorn samt nedströms användning av koldioxid och en översikt av tekniker under utveckling. Denna studie fokuserar på infångning och användning av koldioxid från bio-CCU, dvs. där koldioxiden har biogent ursprung. Olika produkter från CCU har olika omsättningstid vilket innebär att koldioxiden binds olika länge innan frisättning. Bränslen och drivmedel från CCU innebär relativt snabb omsättning medan material med inbunden koldioxid till exempelvis byggnader kan hålla den bunden betydligt längre. Kemikalier från CCU används till en mängd produkter vars användning styr omsättningstiden. Studien fokuserar på s.k. post-combustion CCU, dvs. infångning nedströms en förbränningsprocess vid en punktkälla för koldioxid. Texten redogör översiktligt kring teknikval inom denna kategori samt diskuterar potentiella fördelar och nackdelar mellan dem. Vidare så görs ett nedslag i en ny och lovande teknologi, AMP-NMP, som just nu utvecklas och provas i Sverige och som har potential att genom fassparation ge betydande energibesparingar för koldioxidavskiljning.

De möjliga slutprodukter från CCU som redovisas i denna studie är metan, metanol och FT-bränslen (som bensin, diesel och flygbränsle). Dessa diskuteras både från en teknisk synvinkel men även ekonomiska och marknadsaspekter belyses. Vidare beskrivs generellt hur tillverkningsprocesser och reaktorer ser ut och fungerar. I studien ges även exempel på mass- och energibalanser för metanol samt flygbränsle tillverkade via CCU baserat på tidigare publicerade data. Studien för även översiktliga resonemang kring hur koldioxidkällan påverkar klimatnyttan av slutprodukten samt hur användningen av slutprodukten påverkar densamma. I en kvalitativ hållbarhetsanalys bedöms: Miljöindikatorn som likvärdig för bio-CCS och bio-CCU, Ekonomiindikatorn som något bättre för bio-CCU, Klimatindikatorn som något bättre för bio-CCS, samt den Sociala indikatorn som likvärdig. Beroende på vilken indikator som anses viktigast ur ett visst perspektiv eller en viss förutsättning så kan alltså bio-CCU och bio-CCS falla olika väl ut. Om klimatindikatorn anses överskugga de andra så har bio-CCS en fördel om den innebär permanent bortplockande av koldioxid från atmosfären.

Rapporten exemplifierar därefter kopplingen mellan fjärrvärme och bio-CCU genom fyra olika nyligen genomförda eller pågående projekt där infångad koldioxid används för tillverkning av relevanta produkter: i) Liquid Wind – Grön metanol från el och kraftvärme, ii) Bioelektrojet – flyga på el och kraftvärme, iii) Project Air – Grön metanol för kemiindustrin, samt iv) Nordic GTL – Elektorbränsle och biogas med kraftvärmeintegration i Danmark. Avslutningsvis diskuteras övergripande valet mellan CCU och CCS (Carbon Capture and Storage, Sv.: Koldioxidinfångning och lagring) för fjärrvärmeaktörer.

Nyckelord

CCU, Syntetiska bränslen, Elektrobränslen, Fjärrvärme, Kraftvärme.

Summary

The project is primarily based on available literature as well as previously published and unpublished material. This material has been supplemented by a small number of interviews. The project is a small mapping study of the current state of knowledge and use of CCU in the cogeneration sector as well as downstream use of carbon dioxide and an overview of technologies under development. This study focuses on capture and utilization of carbon dioxide from bio-CCU, i.e. where the carbon dioxide is of biogenic origin. Various products from CCU have different turnover times which means that the carbon dioxide is bound for a different time-period before its release. Fuels from CCU have a relatively short turnover time while materials containing bound carbon dioxide aimed to be used in buildings have a significantly longer turn-over time. Chemicals from CCU can be used for a variety of products whose use in-turn controls the turnover time. The study focuses on post-combustion CCU, i.e. capture downstream a combustion process at a point source for carbon dioxide. The text gives an overview of technology choices in this category and discusses potential advantages and disadvantages between them. Furthermore, a new and promising technology, AMP-NMP, is being discussed more in-depth. This technology is currently being developed and tested in Sweden and has the potential to provide significant energy savings for carbon dioxide capture through phase separation.

The possible end products from CCU which are presented in this study are: methane, methanol, and FT-fuels (patrol, diesel, and jet fuel). These are discussed from a technical point of view but also aspects related to economy and market are considered. Moreover, production processes and reactor characteristics are described. Examples are given on mass- and energy balances for methanol and jet fuel produced through CCU, based on previously published data. The study also presents overarching reasoning around how the climate benefit from the end product is affected by the carbon dioxide source and how the usage of the end product affects the same. In a qualitative sustainability assessment, the environmental indicator is deemed equal for bio-CCU and bio-CCS, the economy indicator is deemed slightly better for bio-CCU, the climate indicator as slightly better for bio-CCS, and the social indicator as equal for the two. Depending on which indicator that is considered to be the most important from a certain perspective or for a specific prerequisite, the overall result can turn out in favour for either bio-CCU or bio-CCS. If the climate indicator is considered to overshadow all other aspects, then bio-CCS has an advantage if it entails permanent removal of carbon dioxide from the atmosphere.

Thereafter, the report exemplifies the connection between district heating and bio-CCU through four recently preformed of still ongoing studies where carbon dioxide is captured and utilized for the production of relevant products: i) Liquid Wind- Green methanol from electricity and combined heat and power, ii) Bio electro jet fuel – Flying on electricity and combined heat and power, iii) Project Air – Green methanol for the chemical industry, and iv) Nordic GTL – Electro fuel and biogas with combined heat and power integration in Denmark. Finally, the overall choice between CCU and CCS is discussed for district heating players.

Innehåll

1	Inledning	8
1.1	Bakgrund	8
1.2	Metod	9
2	Teknik	10
2.1	Avskiljningskoncept	10
2.2	Exempel på avskiljningstekniker under utveckling	11
3	Nedströms användning av koldioxid	13
3.1	Exempel på produkter från CCU	13
3.1.1	Kort om vätgas	13
3.1.2	Metan	14
3.1.3	Metanol	16
3.1.4	FT-Bensin, -Diesel, -Flygbränsle	17
3.1.5	Reaktorbetingelser	19
3.2	Exempel på mass- och energiflöden för en viss mängd slutprodukt	19
4	Koldioxidkällans inverkan	21
4.1	Kvalitativ hållbarhetsanalys	21
5	Fjärrvärme och CCU - Exempelprojekt	24
5.1	LIQUID WIND – GRÖN METANOL FRÅN EL OCH KRAFTVÄRME	24
5.2	BIOELEKTROJET – FLYGA PÅ EL OCH KRAFTVÄRME	25
5.3	Project Air – grön metanol för kemiindustrin	26
5.4	Nordic GTL – Elektorbränsle och biogas med kraftvärmeintegration i Danmark	26
6	Diskussion kring valet mellan CCS och CCU för fjärrvärmesektorn	28
7	Referenslista	29

1 Inledning

Begreppet CCU eller *Carbon Capture and Utilization* syftar på en uppsättning tekniker som fångar in koldioxid för att sedan använda denna som en råvara till att tillverka andra produkter eller tjänster (IEA, 2021). Bio-CCU är ett begrepp som innebär att koldioxiden fångas in från användning, som förbränning, av biogena råvaror. Denna studie fokuserar på infångning och användning av koldioxid från bio-CCU. Det första steget i CCU – infångningen av koldioxid – skiljer sig inte principiellt från hur det görs för CCS (Carbon Capture and Storage): en avskiljningsteknik används för att separera koldioxiden från andra gaser. Detta kan både göras från punktkällor, så som kraftvärmeverk eller industriella processer eller från atmosfären genom s.k. *direct air capture*, men där punktkällor ofta är det mer ekonomiska alternativet p.g.a. högre koncentrationer av koldioxid. Efter att koldioxiden har fångats in så används den i CCU som råvara för att tillverka andra produkter, så som bränslen, kemikalier eller som delmängd i olika byggnadsmaterial. Detta kan antingen göras i anslutning till där koldioxiden har fångats in, eller så kan koldioxiden transporteras till en anläggning på annan plats. Olika bränslen som tillverkas via CCU har relativt kort omsättningstid vilket innebär att koldioxiden återigen frisätts relativt snart efter tillverkningen. Koldioxid som binds in i byggnadsmaterial stannar där under längre tid. Kemikalier från CCU kan användas på en mängd olika sätt och då ingå som komponent i olika slutprodukter. Hur länge det dröjer innan koldioxiden frisätts är beroende av typ av användning och slutproduktens omsättningstid.

1.1 BAKGRUND

Denna rapport utgör en av flera delrapporter från projektet *Bio-CCS i fjärrvärmesektorn*. Projektets huvudmål är att ta fram underlag till och utveckla en strategi för hur fjärrvärmesektorn med hjälp av avskiljning och lagring av biogen koldioxid kan bli en kolsänka till år 2045. Strategin bygger på forskning i projektet som studerar affärsmässiga förutsättningar (AP1), teknik och systemintegration (AP2), infrastruktur och samverkan (AP3), acceptans och regelverk (AP4), hållbarhet (AP5) och avfalls-CCS (AP6). Projektet omfattar även syntes och helhetsbedömning (AP7) samt framtagande av strategi (AP8). En övergripande analys av CCU har också genomförts.

Bakgrunden till projektet är Sveriges klimatpolitiska mål att senast år 2045 inte ha några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären för att därefter nå nettonegativa emissioner. Avskiljning och lagring av koldioxid med biogent ursprung, så kallad bio-CCS eller BECCS, kommer sannolikt att krävas för att uppnå målen. Fjärrvärmesektorn står för en stor andel av Sveriges biogena utsläpp och har stort potential att bidra med minusutsläpp genom bio-CCS och många företag har konkreta planer. Branschen har också som vision att år 2045 vara en kolsänka som hjälper till att minska de totala svenska växthusgasutsläppen.

1.2 METOD

Rapportinnehållet på rubriknivå definierades i samråd mellan beställare och författarna. Rapportinnehållet på detaljnivå har sin utgångspunkt i publicerad litteratur och intervjuer med relevanta aktörer.

2 Teknik

2.1 AVSKILJNINGSKONCEPT

Det finns en mängd olika tekniker för koldioxidavskiljning, vilka brukar delas upp i tre kategorier. "Post-combustion" är tekniker där koldioxid fångas in från rökgaserna efter en förbränningsprocess. "Pre-combustion" är tekniker där bränslet förgasas och/eller reformeras till en blandning av koldioxid, kolmonoxid och vätgas, varpå koldioxid fångas in och vätgasen går in i förbränningen/processen. "Oxyfuel-combustion" är tekniker där bränslet förbränns i en blandning av syrgas och återcirkulerad rökgas, vilket ger en rökgas av koldioxid och vatten som genom kondensering av vattnet kan koncentreras till nästan ren koldioxid.

Tekniker baserade på pre-combustion och oxyfuel-combustion kräver båda förändringar av processen från vilken koldioxid ska fångas in och är därför svårare att tillämpa på befintliga processer. Med anledning av detta så beskrivs inte dessa vidare, utan följande delar fokuserar istället på tekniker för post-combustion. (GCCSI, 2021; Johnsson & Kjærstad, 2019; Wilberforce et al. 2020).

Koldioxidinfångning som görs efter förbrännings-/processanläggningen bygger på två huvudsakliga steg. I det första steget separeras koldioxiden från rökgasen genom att sorberas i ett annat medium. I det andra steget frigörs koldioxid från mediet, vilket ger en i princip ren koldioxidström. Olika tekniker använder sig av olika medier för sorption, inklusive flytande lösningsmedel, fasta adsorbenter, membran och s.k. "solid looping".

Flytande lösningsmedel kan i sin tur delas upp i fysiska och kemiska lösningsmedel. Fysiska lösningsmedel binder koldioxid genom Van der Waals-krafter och har högre absorptionskapacitet vid höga CO₂-koncentrationer (Global CCS Institute, 2021). Kemiska lösningsmedel binder till sig koldioxid genom kemiska bindningar och har högre absorptionskapacitet vid lägre CO₂-koncentrationer (Global CCS Institute, 2021). Monoetylamen är ett kemiskt lösningsmedel som är ett av de mest studerade och som ofta används för benchmarking mot andra medier. (Global CCS Institute, 2021; Filip Johnsson, 2019; Wilberforce, 2020; Ricardo R. Wanderley, 2021)

Fasta adsorbenter nyttjar att molekyler har olika affinitet till ytor för att separera koldioxid från en gasblandning. Liksom för flytande lösningsmedel så finns både de adsorbenter som nyttjar kemisk bindning och de som nyttjar fysisk adsorption. Den typ av koldioxidavskiljning som görs efter förbränningsprocessen (post-combustion) kräver inte någon förändring av den process som avskiljningsprocessen ska integreras i, vilket både pre-combustion samt oxyfuel och processer med slutna cykler gör.

För mer detaljerad beskrivning av olika avskiljningstekniker hänvisas till Beiron m.fl. (2022). Teknik, systemintegration och kostnader för bio-CCS, Rapport 2022:837.

2.2 EXEMPEL PÅ AVSKILJNINGSTEKNIKER UNDER UTVECKLING

En av de största nackdelarna med post-combustion-infångning är dess stora kostnader. Från ett koldioxidinfångningsperspektiv med exemplet CCS kan mer än 70% av de totala kostnaderna (investerings- och driftskostnader per ton koldioxid) vara associerade med infångning och trycksättning för permanent lagring (Vitulo, 2017). För att göra CCS/U till ett ekonomiskt mer attraktivt alternativ så behöver dessa kostnader reduceras. För en av de vanligaste amin-baserade infångningsteknologierna, MEA, så står regenereringssteget där lösningen värms upp för 70-80% av driftskostnaderna (Global CCS Institute, 2021). En kommersiell MEA-baserad anläggning kan ha energiförbrukningssiffror på 3.5-4.3 GJ/ ton CO₂ (Arachchige, 2013).

Ett sätt att minska energibehovet och därmed driftskostnaderna för koldioxidinfångningsanläggningar är att införa avancerade regenereringslösningar som lean vapor compression (LVC), cold solvent split (CSS) and stripper overhead compression (SOC). Kombineras dessa tekniker kan energiförbrukningen minskas med upp mot en tredjedel (Oh, 2020). En annan möjlighet är s.k. advanced flash stripper (AFS) vilken kan minska värmebehovet med 25% (Lin, 2016). Om vattenbaserade lösningsmedel ersätts med organiska dito så kan energibehovet minska men konventionell apparatur fortfarande användas. Exempel på sådana system är water-lean solvents (WLS), om en del av vattnet byts ut, och non-aqueous solvents (NAS), om allt vatten byts. Om organiska lösningsmedel tillsätts en infångningslösning förändras dess fysikaliska egenskaper så att ångbildningsvärmen kan minimeras om ett mindre flyktigt lösningsmedel med högre kokpunkt än vatten används. Lösningsmedel med lägre specifik värmekapacitet än vatten kan också minska mängden energi som behöver tillföras för en önskad temperaturökningseffekt. Vidare så kan lösligheten för koldioxid ibland vara högre i organiska lösningsmedel än i vatten vilket påverkar massöverföringshastigheten av koldioxid i fasgränsytan. För organiska lösningsmedel i tillämpningar för koldioxidinfångning kan dock temperatur och viskositet behöva övervakas noga.

Infångningssystem baserade på fassparation är en från början homogen vätska som separerar i två faser då koldioxid absorberas och reagerar, en koldioxidrik fas och en -fattig dito. Denna typ av system kan i sin tur delas upp i två kategorier, utfällande system där en ny fast fas bildas, och två-vätskefassystem där två icke-blandbara vätskor uppstår vid infångningen. Fördelen med system som dessa är att de två faserna kan separeras innan regenereringsfasen varvid endast en del av systemet behöver värmas upp, med potentiellt drastiskt minskad energiåtgång som följd (Liang, 2015; Shen, 2017). En utmaning med dessa system är att de behöver en annan utformning på apparatur och utrustning jämfört med mer konventionella, vattenbaserade enfassystem.

Lunds tekniska högskola utvecklar just nu ett nytt system för mer energieffektiv koldioxidinfångning, kallat AMP-NMP (Hanna Karlsson, 2021; Meher Sanku, 2020). Systemet innehåller en steriskt hindrad amin, 2-amino-2-metyl-1-propanol (AMP), i organiska lösningsmedel N-metyl-2-pyrrolidon (NMP) och dimetylsulfoxid (DMSO) och har utvärderats med avseende på dess koldioxidavskiljningskapacitet vid institutionen för kemiteknik, Lunds universitet.

De flesta studier på system som innehåller steriskt hindrade aminer har varit vattenlösning av AMP, där stabilt bikarbonat bildas. Däremot leder användning av organiska lösningsmedel till bildandet av det mindre stabila karbamatet. Detta gör det möjligt att regenerera aminen från den fångade koldioxiden vid lägre temperaturer (70°C). Detta innebär alltså att lågvärme tillgänglig i anläggningen kan användas för regenerering av aminen.

Vidare bildas en fällning av AMP-karbamat genom reaktion mellan AMP och CO₂. Utfällningssystem ses ibland som oönskade eftersom de kan orsaka igensättning och avskalning i packade absorptionstorn. Det finns emellertid fördelar med ett utfällningssystem eftersom den fasta fraktionen kan separeras från lösningsmedlet före regenereringssteget. I så fall behöver endast den koncentrerade strömmen värmas upp för regenereringen och därför kan mindre energi behövas för regenereringsprocessen. Energibehovet för regenereringen av aminen har visat sig vara 30-60% lägre än traditionell teknik. Dessa resultat måste valideras ytterligare i pilotskala men visar potential för att minska energibehovet för koldioxidavskiljningsprocessen med denna teknik.

3 Nedströms användning av koldioxid

3.1 EXEMPEL PÅ PRODUKTER FRÅN CCU

Det finns en rad olika produkter som kan bli resultatet av en CCU-process. De skiljer sig åt sinsemellan med avseende på tillverkningsprocessens komplexitet, möjlig effektivitet i densamma, samt vad gäller logistiska och ekonomiska parametrar. Gemensamt för samtliga slutprodukter är dock att råvarorna till denna process är koldioxid och vätgas och målet med processen är att få fram ett bränsle eller annan kemikalie i flytande- (eller gas-) form till hög kvalitet och som efterfrågas på marknaden. Processen innefattar alltså en syntetisering av en mer komplex produkt från två enklare råvaror i en kemisk fabrik. Det är en termisk-katalytisk process lik de som idag används på raffinaderier för petroleumprodukter eller i annan kemisk processindustri världen över. De processer som undersöks är alltså i regel inte nya i sig utan väl kartlagda även om tillämpningen på råvaror med förnybart ursprung är mer utforskad.

Det mest uppenbara elektrobränslet är ren vätgas, då det är vad som tillsammans med syrgas uppstår vid elektrolys av vatten. Alla andra elektrobränslen kräver minst ett ytterligare omvandlingssteg vilket sänker konverteringseffektiviteten från den ingående elektriciteten till kemisk energi i det aktuella elektrobränslet. Vätgas är dock inte ett av de alternativ som undersöks som slutprodukt i denna studie på grund av att det är svårt att hantera, det har relativt lågt energiinnehåll per volymenhet och det inkorporerar inte förnybart kol. Dock så kommer vätgas behöva produceras genom elektrolys som råvara till elektrobränslet vilken blir slutprodukten varför även denna produktion berörs i studien. Produkterna som exemplifieras i denna studie är syntetiska kolväten som framställs genom kemiska reaktioner mellan koldioxid och vätgas under kontrollerade betingelser. Produkterna lagrar alltså energin som användes vid tillverkningen av den ingående vätgasen i ett mer lätthanterligt ämne än vätgas.

Möjliga produkter från denna termisk/elektrisk/kemiska process kan utgöras av, men är inte begränsade till: metan, metanol, syngas, etanol, DME, FT-bensin, -diesel, -flygfotogen, etc. Beroende på vilken av dessa som är processens mål så skiljer sig vald processväg åt. Generellt för alla undersökta processer är dock att de sker under förhöjda temperaturer (minst 200–400 °C), och tryck (vanligtvis 20–50 bar). Katalysatorer används vanligen för att öka effektiviteten i reaktionen genom att sänka aktiveringsenergin för reaktionen till det eftersökta kolvätebränslet. Denna typ av reaktioner är exoterma, dvs. de avger värme, och stora mängder vatten produceras som biprodukt.

3.1.1 Kort om vätgas

Elektrolys av vatten är en välkänd och väl utredd teknologi, delvis genom att utvecklingen av bränsleceller också hjälpte och påskyndade förbättringen av denna systerteknik. Tre huvudsakliga tekniker för elektrolys är intressanta för produktion av vätgas som senare ska förädlas vidare till elektrobränslen eller syntetiska drivmedel: Alkalisk elektrolys (AEL), polymerelektrolytmembran (PEM), och fastoxidelektrolys (SOEC). Alla dessa tre olika teknologier har sina för- och

nackdelar vilka gör dem olika väl lämpade för olika applikationer. AEL har högst teknikmognad, följd av PEM och SOEC. (Götz M, 2016)

Vätgas används som råvara vid oljeraffinering för framställning av till exempel bensin och dieselolja med låg svavelhalt. Under senare år har allt mer vätgas kommit att användas för hydrering av syrerika råvaror till biodrivmedel, ex. tallolja till HVO. Hybrit-projektet tittar på möjligheterna för direktreduktion av järnmalm för koldioxidfri järnframställning i Sveriges masugnar. Detta projekt kommer, om det lyckas, innebära en mycket stor vätgasanvändning i Sverige. Vätgas är även råvara vid produktion av väteperoxid (H_2O_2). Den mesta väteperoxiden i Sverige används för blekning av pappersmassa.

En stor utmaning för ett system för framställning av elektrobränslen via vätgas är vätgasens temporära lagring, ett behov som uppkommer på grund av eventuell fluktuerande krafttillförsel samt varierande elpris, och får intermittent användning av elektrolysören till följd. För vätgassystem så beror lagringssystemets storlek och nödvändig kringutrustning mycket på hur hela systemet för framställning av elektrobränslet är konfigurerat och hur processen körs. Flera möjligheter står till buds för vätgaslagring: tankar för komprimerad gas, kryogent förvätskad vätgas i tankar, metall-hydrid-inbindning eller fysisk lagring i hålrum under jord. Förvätskning av vätgas är en teknisk utmaning och en energimässigt ineffektiv process. Det fluktuerande trycket, kontinuerliga läckaget av vätgas och dyra isoleringen gör denna teknik svår att motivera för lagring i applikationer som den som undersöks i denna studie. Fysisk lagring i hålrum under jord är billig men är bättre lämpad för mer storskalig och långvarig lagring. Alltså är den inte lämpad för ett system som kräver småskaliga, on-site, temporära lagringsmöjligheter för vätgas, vilket de system som är relevanta för den här studien gör. De två bästa lösningarna för vätgaslagring är således som komprimerad gas under höga tryck (250 – 700 bar) eller i tankar med metall-hydrider. Mellan 10–20% av befintliga och planerade liknande system väljer det dyrare, senare alternativet. (Götz M, 2016)

De som använder vätgas i stor omfattning i Sverige idag är raffinaderierna, Sandvik vid sin stålproduktion och det s.k. Stenungsundsklustret med tung kemisk industri. Ett stort svenskt raffinaderi bygger troligtvis inom kort Sveriges hittills största elektrolysanläggning. Denna är tänkt att producera vätgas för hydrering av syrerika "bio-crudes" s.k. bioolja. Vidare så finns planer på ytterligare mycket omfattande vätgasanvändning kopplat till järn och stålproduktion i landets norra delar, ex. inom HYBRIT-projektet, H2 Green Steels planer och LKABs ytterligare ambitioner kring förnybar produktion.

3.1.2 Metan

Metan kan framställas från H_2 och CO_2 / CO genom katalytisk och biologisk metanisering. Processen används för att producera syntetisk naturgas från syntetiserad gas härrörande från kol och biomassa. Det är möjligt att konvertera mer än 99,5% av syngas (blandning av koldioxid och väte) till metan (Hannula, 2015; Mohseni, 2012). Syntesprocessen är exoterm, så den högsta effektiviteten uppnås vid låga temperaturer. Fasta reaktorer används vanligtvis för katalytisk metanisering, men nya reaktorkoncept som trefasmetanisering och mikroreaktorer utvecklas (Götz M, 2016). I biologisk metanisering ersätter mikrober katalysatorer.

Denna process är av ökande intresse men fortfarande under utveckling. Biologisk metanisering kan kopplas till en biogasprocess genom tillsats av väte, eller så kan det göras som en isolerad process (Bensmann A, 2014). Biologisk metanisering kräver en konstant temperatur, vilket minskar anläggningens effektivitet. (Grond L, 2013)

Metanproduktion via CO₂-hydrogenering kallas vanligtvis metanisering och avser produktion av metan från koldioxid, eller kolmonoxid, och väte. Katalytisk eller termokemisk CO₂-metanisering är en jämviktsreaktion, vilken i allmänhet kallas Sabatier-reaktionen. CO₂-metanisering är en exotermisk reaktion, den avger värme, vilken sker i två parallella processer: Omvänd vattengas-skiftreaktion (RWGS) som är endotermisk, tar upp värme, och CO-metanisering som är starkt exotermisk, det motsatta. Sabatier-processen gynnas av högt tryck och låga temperaturer. I verkligheten genomförs dock processen ofta i temperaturspannet 200–550 °C och förhöjda tryck (1–100 bar) (Götz M, 2016). Olika metaller kan användas som katalysatorer för metaniserings-reaktionen men nickel är ofta att föredra på grund av dess höga aktivitet, höga metanselektivitet och låga materialkostnad. De nickelbaserade katalysatorerna kräver dock hög grad av renhet på den ingående gasen och är mycket känsliga för orenheter som exempelvis svavel (Ericsson, 2017). För att uppnå hög konverteringseffektivitet så skall temperaturen hållas relativt konstant och ration H₂: CO₂ vara runt 4. Processen har alltså låg flexibilitet. Sabatier-reaktionen har varit känd i över hundra år men utvecklingen kring CO₂-metanisering har dragit stor nytta av erfarenheterna kring CO-metanisering och produktionen av syntetisk naturgas (SNG) under oljekriserna på 1970-talet. CO-metanisering baserad på syntesgas från kolförgasning är idag välkänd och reaktorer med fixerade bäddar har funnits kommersiellt tillgängliga i decennier (Rönsch, 2016).

Katalytisk CO₂-metanisering för SNG-produktion har också undersökts under ett antal årtionden (Götz M, 2016). I princip så används samma reaktionsvägar som för kolmonoxidmetanisering men det finns ett antal företag som tillhandahåller utrustning skräddarsydd just för koldioxidmetanisering ämnade för användning med antingen ren koldioxid eller biogas som råvara (Rönsch, 2016). Ett exempel är Göteborg Energis anläggning GoBiGas vilken tillverkade SNG från biomassa under perioden 2014–2018. Metanisering kan även ske biologiskt, med hjälp av metagena mikroorganismer, vilket görs i fermenteringsprocessen vid biogasproduktion. Den största fördelen med katalytisk jämfört med biologisk metanisering är den snabbare reaktionshastigheten och lägre reaktorvolymen vilket gör det termokemiska, katalytiska alternativet mer lämpat för större skala. Den största nackdelen med detta alternativ är dock kravet på mycket ren gas i inflödet och processens låga driftflexibilitet, det är därför i dessa områden mycket av nuvarande forskning och utveckling på processen görs. (Rönsch, 2016)

SNG är kemiskt identiskt med huvudkomponenten i naturgas som också är metan. I Sverige förbrukas omkring hälften av alla metan inom industrin. Naturgas är en viktig råvara inom bland annat petrokemiindustrin för framställning av bland annat saftflaskor, leksaker, tvättmedel, plastgolv, mediciner och kabelisolering. Även livsmedelsindustrin, stål- och metallindustrin är stora användare. Metan kan användas som ersättning för i stort sett alla fasta och flytande bränslen i olika

förbrännings-sammanhang. Genom sin enkla kemiska sammansättning är gasen lätt att förbränna och ger mycket små utsläpp av oönskade ämnen jämfört med andra bränslen. Metan kan också användas för fordonsdrift och kallas då fordonsgas. Fordonsgas kan bestå av naturgas eller biogas eller en blandning av dessa. LNG (Liquified Natural Gas) som fartygsbränsle finns nu på den svenska marknaden med mycket goda erfarenheter. Flera rederier investerar i fartyg som kan gå på LNG och flera hamnar planerar för den infrastruktur som krävs. EU satsar stora pengar på teknikutveckling och infrastruktur för LNG som fartygsbränsle.

En variant av Power-to-Gas processen kan användas för att koppla ihop kraftnätet med gasnätet genom att omvandla överskottskraft till gas av nät kvalitet via en tvåstegsprocess: vätgasproduktion genom elektrolys av vatten och konvertering av den uppkomna vätgasen ihop med en extern kolmonoxid eller -dioxidkälla till metan via metanisering (Götz M, 2016). Den uppkomna metanen benämns ofta SNG (syntetisk naturgas, el. substitutnaturgas) och kan injiceras i det befintliga gasnätet, i gaslager, användas som motorbränsle eller i industri och hushåll.

3.1.3 Metanol

Metanol kan framställas från CO₂ i ett eller två steg. Den typiska CO₂-omvandlingen i en fastbäddsreaktor ligger i intervallet 20–40% utan återvinning och CO-bildningen är signifikant, vilket resulterar i behovet av att återvinna oreagerad CO₂, CO och H₂ till matningsströmmen för att nå nästan full CO₂-omvandling och hög metanol-selektivitet (Urakawa A, 2014). Den resulterande produkten är en blandning av metanol och vatten som måste destilleras för att ge renare metanol.

Metanol kan göras genom en kemisk reaktion mellan en koldioxidmolekyl och tre vätgasdito för att ge metanol och vatten. Metanol producerad genom sådan hydrogenering av koldioxid är en viktig representant bland de kemiska omvandlingarna av koldioxid och erbjuder möjligheter till hållbar utveckling (Leonzio., 2018). Generellt sett så kan metanol, i industriella applikationer, produceras från syngas (en blandning av kolmonoxid, koldioxid och vätgas) vid 50–100 bar och 250–300 °C med hjälp av katalysatorer baserade på koppar och zink. Konventionella katalysatorer som CuO/Al₂O₃/ZnO kan också användas med gott resultat. Utbytet av konverteringen beror mycket på ingående gaskvalitet och är högre i en blandning av kolmono- och -dioxid än i ren koldioxid. Produktion av metanol från ren koldioxid och vätgas har ett antal termodynamiska begränsningar vilka kan kräva att vatten aktivt sorberas i processen då det annars kväser reaktionshastigheten vid koldioxid-hydrogenering. Detta gäller speciellt i RWGS-reaktionen. Metanol skulle kunna tas ut in-situ från reaktorn vilket starkt hade drivit jämvikten. Baserat på Le Chateliers principer så kan alltså de termodynamiska begränsningarna i stor grad elimineras vid kontinuerlig in-situ sorbtion av reaktionsprodukterna. Det finns olika separationstekniker för detta, exempelvis membran, där samma omsättning kan nås fast vid lägre tryck och temperaturer än i en konventionell reaktor. Flera studier visar att maximal konvertering sker vid en koldioxidkoncentration i syngasblandningen av 2–5 mol % av totalt kol. Termodynamiskt gynnas reaktionen av låga temperaturer även om

det missgynnar kinetiken och det finns utrymme för mer aktiva katalysatorer. Okonverterad gas bör recirkuleras i processen för ökat utbyte men det, liksom in-situ-extraktion, medför givetvis ökade investeringskostnader för processen (Leonzio., 2018).

Moderna katalysatorer förväntas hålla i en process i minst tre år, och ibland så länge som det dubbla. De är högselektiva (+99,5%) mot metanolproduktion men fortfarande känsliga mot förgiftning av föroreningar i den ingående gasen. Sedan introduktionen av lågtrycksprocessen för över 50 år sedan har mycket av utvecklingsfokuset i industrin legat på effektivisering av konverteringsprocessen och nuvarande standardprocessen LCM kan nå ett energibehov under 30 GJ per ton producerad metanol.

Metanol är en mycket flexibel alkohol som kan användas både som bränsle och i kemisk industri. En framtida förskjutning från en olje- och gasekonomi mot en "metanolekonomi" har föreslagits (Olah GA, 2019). Som råmaterial utgör metanol bas för produktion av hundratals olika kemikalier så som: formaldehyd, metyltertertbutyleter (MTBE), ättiksyra, metylmetakrylat, dimetyltereftalat och olefiner (etylen och propylen), av vilka alla är grundläggande byggstenar för en stor mängd produkter från den kemiska industrin. Metanol kan också användas som drivmedel, som en vätebärare för bränsleceller eller i vattenrening och kraftproduktion. Alltså är det ett utmärkt bränsle och startpunkt för viktiga industriella reaktionsvägar och processer (Bansode & Urakawa, 2014).

Expansionen av metanol har historiskt drivits av behovet av dess derivat (exempelvis DME m. fl.) och dess möjliga användningsområde som drivmedel för landfordon (Sheldon., 2017). De anläggningar som har byggt mot den fonden har allt som oftast använt fossila råvaror som kol, naturgas eller nafta. Intresset har ökat ett antal gånger, speciellt när länder har svårt med petroleumimport av olika anledningar. Idag är den främsta drivkraften att konstruera nya anläggningar för att producera metanol för vidareförädling till olefiner men en del av den förnybara producerade metanolen används också som inblandningsbränsle i petroleumbaserade drivmedel för att möta lagkrav. De allra flesta metanolproduktionsanläggningar har fossil råvara men ett exempel på motsatsen är Carbon Recycling International's (CRI) George Olah anläggning på Island som startade 2012. Anläggningen använde förnybar el till att producera vätgas via vattenelektrolys vilken kombineras med koldioxid uppsamlad vid geotermiska kraftstationer. Metanolproduktion baserad på konventionell teknologi har betydande skalfördelar och troligtvis kommer stora anläggningar att fortsätta byggas de kommande åren. Det pågår forskning kring lågtemperatur-konvertering av metan till metanol vilket hade kunnat ge en betydligt mer energieffektiv produktion av metanol i framtiden.

3.1.4 FT-Bensin, -Diesel, -Flygbränsle

Koldioxid kan användas direkt i vissa reaktorer, till exempel med användning av Sabatier-reaktionen för att producera metan, medan andra reaktionsvägar börjar från kolmonoxid som i Fischer-Tropsch (FT)-syntesen. Koldioxid kan reduceras till kolmonoxid via den omvända vattengas-skift-reaktionen (RWGS). Reaktionen är endoterm och höga temperaturer är fördelaktiga för reaktionen (Urakawa A, 2014),

vilket ger nästan fullständig omvandling vid temperaturer överstigande 830 °C (Graves C, 2011). Vattengas-skifts-reaktionen¹ (WGSR) beskriver reaktionen mellan kolmonoxid och vattenånga för att bilda koldioxid och vätgas (en blandning mellan kolmonoxid och vätgas, inte vatten, kallas vattengas).

Beroende på reaktionsbetingelserna kan jämvikt för vattengas-skiftet förskjutas i de olika reaktionsriktningarna. Vändbarheten hos WGSR är viktig vid framställning av ammoniak, metanol och Fischer-Tropsch-syntes (FT) där förhållandet vätgas mot kolmonoxid är kritiskt. Koppling av RWGS med vattenelektrolyprocessen ger metan och syre. Efter elektrolys, kan det producerade vätet återvinnas tillbaka i RWGS-reaktorn för fortsatt omvandling av koldioxid. Eftersom denna reaktion endast är lindrigt endoterm kan den termiska effekt som krävs för att driva denna reaktion framställas av en Sabatier-reaktor.

Fischer-Tropsch-processen är en samling kemiska reaktioner som omvandlar en blandning av kolmonoxid och väte till flytande kolväten. Dessa reaktioner uppträder i närvaro av metallkatalysatorer, typiskt vid temperaturer av 150–300 °C och tryck av en till flera tiotals atmosfärer. Processen utvecklades först av Franz Fischer och Hans Tropsch vid Kaiser-Wilhelm-Institut für Kohlenforschung i Mülheim an der Ruhr, Tyskland, 1925. Som ett av de främsta exemplen på C1-kemi är Fischer-Tropsch-processen en viktig reaktion i både kolförvätskning och gas till vätsketeknik för framställning av flytande kolväten. Vid det vanliga genomförandet framställs kolmonoxid och väte, råmaterialen för FT, från kol, naturgas eller biomassa i en process som kallas förgasning. Fischer-Tropsch-processen omvandlar sedan dessa gaser till allt från kortare kolväten, syntetiskt bränsle eller smörjolja. Längden på de bildade kylkedjorna beror på vilka processparametrar som används och hur länge reaktionen tillåts fortlöpa. En mängd olika kolväten, inklusive bensin, flygfotogen och diesel, produceras genom Fischer-Tropsch-syntes (Selma Brynolf, 2018). Kedjetillväxten beror på katalysatorerna och syngaskompositionen såväl som på temperatur och reaktortryck (Graves C, 2011). Viktigt att komma ihåg är att en FT-process skapar en viss fördelning av kolvätekedjor. Molekyler med den eftersökta kedjelängden behöver alltså separeras från övriga vid reaktorns utlopp. Användningsområdena för FT-bensin, -diesel och -flygfotogen är, liksom för deras fossila motsvarigheter, främst som drivmedel för transporter.

Under andra världskriget användes FT-tekniken av Tyskland för kolförvätskning för att producera syntetiska drivmedel då de hade svårt med import av petroleumprodukter och liten inhemsk oljeproduktion. Senare har bland annat Sydafrika vidareutvecklat och använt tekniken för att kunna producera drivmedel baserat på egna koltillgångar. Idag finns ett antal anläggningar i drift för produktion av syntetiska drivmedel från fossila råvaror, bland annat i mellanöstern och Nordamerika. Det finns anläggningar för förgasning av avfall i Kanada och Finland vilka har tittat på användning av FT-teknik och det pågår ett

¹ WGSR upptäcktes redan under slutet av 1700-talet men det var först långt senare som det industriella värdet av reaktionen började förstås. Före början av 1900-talet erhöles väte genom att reagera ånga under högt tryck med järn för att producera järn, järnoxid och väte. Med utvecklingen av industriella processer som krävde väte, såsom Haber-Bosch ammoniak-syntesen, behövdes en billigare och effektivare metod för väteproduktion. Som en lösning på detta problem kombinerades WGSR med förgasningen av kol för att producera en ren vätgas.

antal projekt för etablering av pilot-och demoanläggningar i Norden och Sverige för produktion av förnybara drivmedel (bl.a. flygbränsle (Fagerström, et al., 2021)) genom tillämpning av tekniken.

3.1.5 Reaktorbetingelser

Beroende på vilken process som väljs ställs speciella krav på den katalysator och reaktor som används. Två olika strategier kan användas för metanisering kopplat till PtG eller Power-to-Biofuels (PtBf) -applikationer. Antingen så kan reaktorn arbeta under steady-state (konstanta) förhållanden eller under mer dynamiska betingelser. För det första alternativet behövs stor lagringsförmåga för vätgas för att kunna försä den efterföljande syntesreaktionen med ett konstant vätgasflöde. Detta ökar dock anläggningskostnaderna avsevärt och talar därför emot detta val (Götz M, 2016). Sålunda är det en kostnadsfördel om det efterföljande syntessteget är kapacitetsflexibelt i sin natur. Dynamisk drift ändrar avsevärt kraven som ställs på katalysatorn och reaktorn. En aspekt är stand-by driften av reaktorn. Här kan en katalysator uppvisa snabb oxidation i en koldioxidrik atmosfär men vara mycket stabil i en vätgasdominerad miljö. Om processen körs dynamiskt så måste temperaturstyrningen av reaktorn vara tillräckligt snabb för att inte temperaturen skall skena med skador på utrustning och katalysatorn som följd. Forskning görs på katalysatorer som klarar temperaturväxlingar med relativt hög frekvens och amplitud. Isotherma reaktorer kan mycket väl uppvisa bättre temperaturkontroll under dynamiska processbetingelser. Om vätgasproduktionen från elektrolysören är otillräcklig så kan syntesreaktorn tvingas stängas ned. Om detta är en risk, så krävs en reaktortyp som klarar snabba ned- och upp-rampningar samt har snabba start- och stoppsekvenser. Det har gjorts försök på reaktorer som klarar mycket snabba sådana sekvenser (F. Graf, 2014).

3.2 EXEMPEL PÅ MASS- OCH ENERGIFLÖDEN FÖR EN VISS MÄNGD SLUTPRODUKT

Nedan följer mass- och energiflöden för två olika CCU-produkter. Tabell 1 visar flöden för en konceptuell anläggning för e-metanol, i stil med den som beskrivs i avsnitt 4.1. Tabell 2 visar motsvarande flöden för en konceptuell bioelektrojetanläggning som beskrivs i avsnitt 4.2. I bioelektrojetanläggningen så utgör flygbränslet runt 40 viktsprocent av slutprodukterna, med resten fördelat på bl.a. diesel, bensin och vaxer. Beräkningarna har därför gjorts utifrån antagandet att flygbränslet endast allokeras 40% av dessa flöden. Som tabellerna visar så är behovet av vatten, koldioxid och energi i samma storleksordning för de båda processerna, men något lägre för metanolprocessen.

Tabell 1. Mass- och energiflöden för en anläggning för e-metanol. I massbalansen ingår egentligen fler flöden (t.ex. elektrolytlösning och utflöde av vatten), men i denna tabell har endast de flöden som bedöms relevanta för jämförelsen inkluderats. Energianvändning för uppströms koldioxidinfångning är inte inkluderad. (Matzen, Alhajji, & Demirel, 2015)

		Enhet
Koldioxid (CO ₂)	0,251	kg
Vatten (H ₂ O)	0,203	kg
Energi (värme + el)	1,92	kWh
Metanol (MeOH)	1	kWh

Tabell 2. Mass- och energiflöden för en bioelektrojetanläggning. Värderna är beräknade utifrån att flygbränslet allokeras 40 viktspocent av slutprodukterna och att överskottsvärmen kan få avsättning i ett t.ex. ett fjärrvärmenät. I massbalansen ingår egentligen fler flöden (t.ex. MEA och utflöde av vatten), men i denna tabell har endast de flöden som bedöms relevanta för jämförelsen inkluderats. Energianvändning för uppströms koldioxidinfångning är inte inkluderad. (Fagerström, et al., 2021)

		Enhet
Koldioxid (CO ₂)	0,347	kg
Vatten (H ₂ O)	0,437	kg
Värme	-0,823 ¹	kWh
El	2,83	kWh
F-T bio-electro jet fuel	1	kWh

¹ Överskottsvärme från processen som går in i fjärrvärmenät i detta exempel.

4 Koldioxidkällans inverkan

Klimatnyttan (i form av minskade växthusgasutsläpp jämfört med fossil motsvarighet) för ett syntetiskt kolväte framställt från infångad koldioxid är direkt beroende av dess råvarors påverkan. För att riktigt hög marginalnytta ska kunna uppnås måste den el som används för vätgasen till syntesen vara så förnybar som möjligt samt koldioxiden för dito komma från förbränningen av biogena råvaror. Så fort ett avsteg görs från detta blir effekten att klimatnyttan för slutprodukten sjunker, vilket har visats i nyligen publicerade rapporter (Fagerström, et al., 2021). Då det går åt stora mängder elenergi för att framställa den vätgas som behövs så har elens ursprung en stark effekt. Vidare så är även användningen av produkten tillverkad via CCU mycket viktig för dess klimatnytta. Om ett drivmedel med kort omsättningstid tillverkas så är klimatnyttan för ett visst valt tidsperspektiv lägre än om ett material med mer långvarig koldioxidinbindning tillverkas. En ytterligare aspekt som påverkar klimatnyttan är vad produkten tillverkad via CCU ersätter. Om en fossil produkt undanträngs uppstår en större samlad klimatnytta än om en produkt med större andel förnybart ursprung ersätts.

4.1 KVALITATIV HÅLLBARHETSANALYS

För att få en heltäckande bild av hur bio-CCS och bio-CCU står sig mot varandra så behöver en djupgående analys för hela livscykeln i ett systemperspektiv göras. En analys som tar hänsyn till en lång rad hållbarhetsindikatorer och väger dem mot varandra enligt gängse metodik (Nasim Pour, 2017). En sådan studie ryms inte inom ramen för denna studie. Vidare så kommer de specifika förutsättningarna för varje individuell tillämpning av CCU eller CCS att skilja sig åt vilket får till följd att de olika teknikerna kommer att falla olika väl ut baserat på hållbarhetsindikatorer i olika kontext (Lydia Stougie, 2018). Detta hindrar dock inte att ett generellt resonemang förs kring förväntade skillnader mellan de olika teknikerna och vilken generisk effekt de skulle kunna få i de flesta fall. Observera att detta är en mycket grov skattning gjord i samråd med experter, men absolut inte heltäckande. Resultat för specifika fall kan alltså skilja väsentligt från nedan.

Exempel på hållbarhetsindikatorer där CCS/U bedöms ha stor effekt är:

- Miljö: i form av materialanvändning (för att täcka in cirkularitet), biodiversitet genom exempelvis inverkan från skogs- och lantbruk på biodiversitet
- Ekonomiska: i form av jobbskapande och ekonomiskt värdeskapande.
- Klimatmässigt: i form av minskade koldioxidutsläpp.
- Sociala: i form av bekvämligheter, hälsa etc.

Uppströms användning eller komprimering så skiljer sig CCS/U inte nödvändigtvis åt. Det finns vissa uppströms processer som lämpar sig bättre för olika slutändamål men överlag så är de i princip likvärdiga. Nedströms så är dock koldioxidhanteringen olika för de två teknikerna. För CCS komprimeras koldioxiden och fraktas från platsen för infångning och till lagring där den pumpas in. Detta är processer som alla kräver energi, både vid infångningsplatsen, längs distributionskedjan och vid lagringen. Uppskattningar gör gällande att så mycket som 70% av kostnaderna för CCS kan utgöras av denna hantering (Vitillo, 2017).

För CCU används koldioxiden (ofta lokalt) för att tillverka en syntetisk produkt. Detta kräver stora mängder el och vatten för att producera vätgas till processen samt en nedströms processanläggning som kan jämföras med en mindre kemisk industrianläggning (Fagerström, et al., 2021). Till skillnad från CCS så är energianvändningen här större (om all infångad koldioxid ska konverteras), å andra sidan är den lokal (och inte utspridd som för CCS) vilket kan vara en fördel om det finns riklig tillgång på elenergi. CCU har potential att tillföra nytta i form av tjänster till energisystemet. Exempelvis kan balanseringstjänster och flexibilitetspotential uppnås i ett system med CCU där elektrolysörskapacitet kan skalas och användas vid tillgänglig effekt och fördelaktigt elpris.

För CCU går mycket material åt till byggnationen av syntesfabriken medan material istället går åt vid distribution och lagringsfaciliteter för CCS. Det är inte nödvändigtvis så att en av de båda teknikerna kräver en större ökning av råmaterial (i form av ökad användning av biomassa till verket) än den andra och således är det inte heller självklart vilken av dem som har störst påverkan på biodiversitet. Klart är dock att CCU kräver mer elenergi.

Ekonomiskt sett så skiljer sig de båda teknikerna åt. CCS innebär en kostnad men inga direkta ekonomiska vinster. En del arbetstillfällen kan sannolikt skapas längs distributionskedjan, men många av dessa kan vara förlagda vid slutförvaring utomlands. CCU innebär en hög kostnad men också ekonomiska vinster i och med att högvärdiga förnybara produkter skapas som kan fylla en efterfrågan på marknaden. Så länge anläggningen är stor nog, elen billig nog och drifttiden hög nog så finns beräkningar som visar att det går att tillverka förnybara syntetiska kolväten till kostnader som kan bli konkurrenskraftiga framöver (Fagerström, et al., 2021). Processanläggningen för att tillverka de syntetiska kolvätena kommer också att skapa arbetstillfällen i Sverige. Vidare så kan intermediära produkter hjälpa den svenska raffinaderinäringen och petrokemiska industrin att ställa om sin verksamhet till förnybar vilket i sin tur påverkar många arbetstillfällen.

Klimatmässigt så innebär CCS en permanent lagring av koldioxid. Om koldioxiden är biogen så blir nettoeffekten en minskning av mängden koldioxid i atmosfären, om återväxt av biomassa tas med i beräkningarna. CCU använder koldioxid för att tillverka produkter som ofta förbränns någon annanstans och där istället ger upphov till diffusa koldioxidutsläpp. Vid en direkt jämförelse är alltså CCS bättre för klimatet än CCU. Å andra sidan så kan de produkter som tillverkas via CCU tränga undan andra likvärdiga men fossila produkter från användning och därmed dämpa ökningen av fossila koldioxidutsläpp, en effekt som inte uppnås med CCS. Vid nyetablering av bio-CCS som leder till ökad bioenergi och CCS kan dock fossilt trängas undan och negativa utsläpp genereras parallellt.

CCS och CCU bedöms generellt inte ge upphov till väsentliga skillnader vad gäller sociala aspekter som bekvämligheter och hälsa. Möjligen kan CCS ha en inverkan i form av ökat totalt transportarbete i Sverige men denna kvantifiering ryms inte inom den kvalitativa analys som denna studie utgör.

Sammantaget bedöms Miljöindikatorn som likvärdig för bio-CCS och bio-CCU, Ekonomiindikatorn som något bättre för bio-CCU, Klimatindikatorn som något bättre för bio-CCS, samt den Sociala indikatorn som likvärdig. Beroende på vilken

indikator som anses viktigast ur ett visst perspektiv eller en viss förutsättning så kan alltså bio-CCU och bio-CCS falla olika väl ut. Om klimatindikatorn anses överskugga de andra så har CCS en fördel om den innebär permanent bortplockande av koldioxid från atmosfären.

5 Fjärrvärme och CCU - Exempelprojekt

Redan idag finns flera projekt igång i Sverige och i Norden som rör CCU med koppling till fjärrvärme. Kopplingen till fjärrvärmesektorn skiljer sig åt mellan projekten, där vissa innefattar CCU direkt kopplat till fjärrvärmeanslutna kraftvärmeverk medan andra rör fjärrvärmeanslutna industrier. En del av projekten har i nuläget endast utretts i genomförbarhetsstudier medan andra redan har påbörjat processer för tillståndsansökan och finansiering. Nedan följer beskrivningar av fyra projekt som bedöms utgöra relevanta exempel för fjärrvärmesektorn i Sverige.

5.1 LIQUID WIND – GRÖN METANOL FRÅN EL OCH KRAFTVÄRME

Ett exempel på CCU i fjärrvärmesektorn i Sverige är företaget Liquid Wind som har tagit fram ett koncept för att göra metanol av förnybar el och koldioxid från punktkällor (Liquid Wind, 2021). Företaget har inte utvecklat tekniken för någon av delprocesserna själva, utan har satt samman ett konsortium av företag som står för de olika delarna. Utöver Worley som ansvarar för förprojektering så innefattar konsortiet även teknikleverantörer för metanolsyntes (Haldor Topsoe), elektrolys (Siemens Gamesa), värmeintegrering (Alfa Laval) och koldioxidavskiljning (Carbon Clean). Den första anläggningen är tänkt att byggas i Örnsköldsvik, i anslutning till det lokala kraftvärmeverket Hörneborgsverket.

På anläggningen kommer biogen koldioxid att avskiljas från Hörneborgsverkets rökgaser. Vätgas produceras genom elektrolys av vatten, för att sedan blandas med den avskilda koldioxiden. Därefter komprimeras till högt tryck innan blandningen leds in i en reaktor för att syntetiseras till metanol i en katalytisk reaktion. Eftersom en stor del av gasblandningen inte reagerar omedelbart så återcirkuleras den för att ge ett högt utbyte, samtidigt som en liten ström av processgaser avleds för att undvika anrikning av inerta gaser i processen. Utöver metanol så bildas det även vatten, etanol och mindre mängder tyngre alkoholer i processen från vilka metanol av teknisk kvalitet separeras genom destillation. (Sweco 2021)

Liquid Winds anläggning kommer att byggas på en grannfastighet till Hörneborgsverket och mellan dessa anläggningar kommer material- och energiflöden att gå i båda riktningar. Kraftvärmeverket ägs av det lokala energibolaget Övik Energi och byggdes 2008 med en kapacitet på 130 MW för att kunna leverera el, värme och ånga (Övik Energi, 2021). År 2020 utgjordes bränslemixen i verket till 86% av träbränslen, 13% torv och resterande delar fossil eldningsolja (Sundström, 2021). Från kraftvärmeverket kommer bl.a. biogena rökgaser, avjoniserat vatten, ånga och kylning att levereras (Sweco 2021). Avjoniserat vatten krävs för den elektrolys som framställer vätgasen. Processånga (20 MW) och kylning (50 MW) tillförs för att täcka de behov som inte kan täckas internt. Biogen koldioxid ska avskiljas från rökgaserna med hjälp av ett lösningsmedel som är en hybrid mellan aminer och salter. Det kombinerar den snabba kinetiken hos aminer med det låga energibehovet för regenerering hos salter (Mahdi Sharifzadeh, 2016). Med denna avskiljningsteknik väntas anläggningen kunna uppnå en avskiljningsgrad på 80-90% (Sweco, 2021). Från

CCU-anläggningen tillbaka till kraftvärmeverket kommer bl.a. värme och alkoholer att överföras. Värme uppstår i både framställningen av vätgasen och metanolsyntesen och av denna väntas 15 MW kunna föras över till Övik Energis fjärrvärmenät. De alkoholer som överförs är både etanol och andra tyngre alkoholer men även den metanol som inte kunnat separeras från restflödet. Dessa planeras användas som bränsle i Hörneborgsverket.

Anläggningen kommer att ha produktionskapacitet på 360 GWh metanol per år (Sweco, 2021). Metanolen ska levereras med rör till en tankfarm på angränsande fastighet, varifrån den kan distribueras för användning inom bl.a. sjöfart och industri. Slutgiltigt investeringsbeslut för anläggningen i Örnköldsvik väntas tas under 2022 vilket kan möjliggöra produktionsstart år 2024. Därutöver finns planer på att bygga ytterligare nio anläggningar före 2030 innan verksamheten kan expandera internationellt.

5.2 BIOELEKTROJET – FLYGA PÅ EL OCH KRAFTVÄRME

Ett annat svenskt exempel på CCU finns i det projekt som drivs kring Jämtkrafts kraftvärmeverk i Östersund. I en genomförbarhetsstudie (Fagerström, et al., 2021) som avslutades 2021 undersöktes förutsättningarna för att producera förnybart flygbränsle baserat på biogen koldioxid från kraftvärmeverket och vätgas från elektrolys.

I studien undersöktes framförallt två olika processvägar för att producera förnybart flygbränsle från vätgas och koldioxid: Fischer-Tropsch (F-T)-reaktion och modifierad alkohol-till-Jet (AtJ)-reaktion via metanol. För F-T-spåret omvandlas först koldioxid och vätgas till kolmonoxid och vatten genom en omvänd vattengasförskjutningsreaktion. Kolmonoxiden reagerar sedan katalytiskt med vätgas i en F-T-reaktion för att bilda en blandning av ogrenade kolväten. AtJ-spåret bygger på att koldioxid och vätgas omvandlas katalytiskt till metanol, som sedan genom polymerisation bildar en blandning av ogrenade kolväten. I både F-T- och AtJ-spåret behöver blandningarna av ogrenade kolväten sedan genomgå en separationsprocess för att uppnå ett bränsle med liknande sammansättning som konventionellt flygbränsle. I det studerade fallet görs detta genom destillering, men mer invecklade processer kan användas för att uppnå mer specifika egenskaper. Förutom flygbränslet så bildas även andra produkter i processen, så som bensen, diesel och vaxer.

Kraftvärmeverket Lugnvik som genomförbarhetsstudien fokuserade ligger i Östersund och ägs av Jämtkraft. Med en elektrisk effekt på 45 MW och en värmeeffekt på 80 MW så drivs det med varierande effekt under hela året förutom under två av sommarmånaderna då det stängs ner för underhåll. Bränslemixen i kraftverket består i dagsläget framförallt av olika skogsbränslen. I studien dimensionerades biojetanläggningen utifrån runt 50-60% av kraftvärmeverkets kapacitet. Både material- och energiintegrering kan göras mellan kraftvärmeverket och biojetanläggningen. Materialflödet utgörs av biogen koldioxid som avskiljs från kraftvärmeverkets rökgaser och blir råvara i biojetproduktionen. Avskiljningen görs med en aminlösning (monoetylamen), designad för en avskiljningsgrad på 70%. Energiintegrering görs genom att biojetanläggningen

försörjs med primärvärme från kraftvärmeverket medan sekundärvärme leds tillbaka via kraftvärmeverket till fjärrvärmenätet. På detta sätt minskas primärenergibehovet i biojetanläggningen med 27.4 MW och 15 MW av överskottsvärmen kan användas i fjärrvärmenätet.

Anläggningen designades i förstudien till att kunna producera 380-480 GWh flygbränsle per år. Den nämnda studien var en genomförbarhetsstudie, och just nu fortsätter arbetet med att förverkliga resultaten från studien i samarbete med andra aktörer.

5.3 PROJECT AIR – GRÖN METANOL FÖR KEMIINDUSTRIN

Hos kemiföretaget Perstorp i Stenungsund pågår idag ett CCU-projekt som inte involverar något kraftvärmeverk men som ändå kopplar till fjärrvärmesektorn. Projektet syftar till att ersätta den fossila metanol som används idag med metanol som produceras av förnybar el och koldioxid från verksamheten (Project Air, 2021). Detta ska ske på Perstorp Oxos anläggning i Stenungsund, som redan idag är en stor leverantör av värme till fjärrvärmenätet i Stenungsund (Stenungsund energi, 2021). Produktionen ska utgå från en process där en blandning av syngas, koldioxid och vätgas blir råvara för metanolproduktion (Project Air, 2021). Koldioxidinfångning ska användas för att fånga in koldioxid från Perstorps existerande anläggning. Parallellt med detta kommer syngas att framställas från biogas och restströmmar från anläggningen. Syngasen och koldioxiden kommer sedan att blandas och reageras med vätgas framställd genom elektrolys från förnybar el. Sammantaget möjliggör detta en flexibilitet i råvaran, där både existerande utsläpp av koldioxid och restströmmar nyttjas, men där detta kan balanseras med syngas från biogasen.

Målet med projektet är att börja producera metanol på detta sett år 2025, för att ersätta de 200 000 ton metanol som Perstorp årligen använder som råvara i sin europeiska produktion av kemiprodukter (Project Air, 2021). Detta skulle kunna leda till utsläppsminskningar på 500 000 ton koldioxid per år (Project Air, 2021). I början av 2021 fick Perstorp besked från EUs innovationsfond att projektet gått vidare till nästa utvärderingsrunda för finansiering och kort därefter meddelade även Energimyndigheten att projektet tilldelats ett bidrag på 295 miljoner kr som en del av Industriklivet (Project Air, 2021; Energimyndigheten, 2021).

5.4 NORDIC GTL – ELEKTORBRÄNSLE OCH BIOGAS MED KRAFTVÄRMEINTEGRATION I DANMARK

Nordic GTL är ett exempel på CCU i Danmark, där en förstudie (Winter Mortensen, o.a., 2019) för en anläggning för förnybar flygbränsleproduktion avslutades 2019. I projektet undersöktes olika teknologivägar och processer för att producera flygbränsle från förnybar metan, vätgas och koldioxid samt hur genomförbarheten för dessa ser ut. Studien visade på lovande resultat för en sådan anläggning och projektet har nu utvecklats vidare genom två spinoff-projekt på Fyn och i Sønderborg (Porsgaard, 2021).

Studien fokuserar framförallt på processvägar som går via F-T-reaktionen, där syngas omvandlas till en blandning av ogrenade kolväten vilket genom en separationsprocess ger flygbränsle. Tre olika alternativ för att producera syngasen

undersöks. Ett alternativ är att biogas uppgraderas (renas från koldioxid) till biometan, vilken sedan genom ångreformerings, partiell oxidation och katalytisk partiell oxidation omvandlas till syngas. Ett andra alternativ innebär en utökning av detta, då koldioxiden som separeras från biogasen vid uppgraderingen tas om hand för att genom reaktion med elektrolytisk vätgas bilda elektrometan. I det tredje alternativet fångas koldioxid in från en punktkälla för att reagera med vätgas till syngas i en omvänd vattengasförskjutningsreaktion. Alla processvägar bygger sedan på samma process för F-T-reaktion och efterföljande separation.

Koldioxidkällan skiljer sig åt för de olika processvägar som beskrivs ovan. I fallen som baseras på biogas så är det decentraliserade biogasanläggningar som står för leveransen av koldioxid, men då i formen av metan. Ett av fallen inbegriper endast nyttjande av metandelen av biogas och ingen infångning av koldioxid, vilket gör att detta inte kan klassas som CCU. I fallet där koldioxiden från biogasen omvandlas till elektrometan så rör det sig dock om CCU och likaså i fallet där koldioxid från en punktkälla genomgår omvänd vattengasförskjutningsreaktion. En avgörande skillnad mellan dessa fall är att processvägen via elektrometan baseras på decentraliserad CCU (vid biogasanläggningarna) medan vägen med punktkälla av koldioxid har ett centraliserat upplägg. Detta medför olika möjligheter för material- och energiintegrering mellan koldioxidkällorna och nedströms anläggningar (F-T och separation). Studien är inte begränsad till specifika platser eller anläggningar, men gör en första undersökning av tre olika lokaliseringar i Danmark.

Anläggningarna som studien undersöker innebär olika grad av koldioxidinfångning beroende på kolkälla och processväg, där användning av enbart biogas inte innebär någon infångning medan vägen via punktkällor har potential att fånga in stora mängder. Storleksordningen som undersöks är en anläggning som kan producera upp till 1400 GWh flygbränsle.

6 Diskussion kring valet mellan CCS och CCU för fjärrvärmesektorn

CCU är ett koncept som presenterar möjligheter för den svenska fjärrvärmesektorn. Många verk förbränner i dag mestadels biogen råvara och tillgången på förnybar el är mycket god på flera ställen i landet. Vidare så finns tekniken redo för att tillverka många olika typer av syntetiska kolväten i en fabrik integrerat med ett verk för fjärrvärmeproduktion. Själva länken till fjärrvärmenätet och den djupa integreringen mellan tillverkningsprocessen för de nya produkterna och befintlig värmeproduktion är central för att verkningsgraden för hela systemet ska kunna bli så hög som möjligt. Det gör fjärrvärmeverk till en potentiellt effektiv tillämpning av CCU-konceptet för tillverkning av syntetiska kolväten. Till stor del beror detta på att energisströmmar kan användas kaskadmässigt i ett integrerat verk/fabrik med effektiv värmeväxling mellan olika delprocesser och effekten blir att produktionskostnaden för den syntetiska slutprodukten kan bli lägre då processen görs energieffektivt. Möjligheterna är att kunna använda sina koldioxidutsläpp för att tillverka en förnybar, högvärdig och efterfrågad produkt. Vid sidan av huvudprodukten kommer en del av insatsråvaran och energin att fördelas till olika biprodukter. Dessa kan till en början återcirkuleras i processen, eller energiåtervinnas, för att i ett mer utvecklat koncept också utgöra högvärdiga beståndsdelar i utvecklade värdekedjor.

Hållbarhetsmässigt bedöms Miljöindikatorn som likvärdig för bio-CCS och bio-CCU, Ekonomiindikatorn som något bättre för bio-CCU, Klimatindikatorn som något bättre för bio-CCS, samt den Sociala indikatorn som likvärdig.

Att börja använda bio-CCU för en fjärrvärmeproducent innebär vidare att man ger sig in i en kemisk processindustri med allt vad det innebär av lagar, regleringar och komplexitet. För ett energibolag innebär det att man involveras i en ny bransch med nya spelregler om man väljer att göra det själv. Här kan det vara klokt att söka samarbeten utanför sin traditionella verksamhetssektor, med aktörer med etablerad expertis, erfarenhet och infrastruktur inom det produktsegment man söker verka inom, exempelvis drivmedelsbolag, petrokemisk industri, etc. Flera olika värdekedjor är möjliga att integrera i befintlig petrokemisk industri ex. Bioolja från termisk behandling av skogsråvara, Elektroolja från CCU, och kemisk återvunnen plast. Det behövs kartläggning och forskning kring hur växelverkan mellan aktörer från olika sektorer kan se ut samt hur de olika värdekedjorna står sig emot varandra m.a.p. olika hållbarhetsindikatorer.

7 Referenslista

- Arachchige, U. M. (2013). Alternative solvents for post combustion carbon capture. . *Int. J. Energy Environ.*, 4, 441–448.
- Bansode, A., & Urakawa, A. (2014). Towards full one-pass conversion of carbon dioxide to methanol and methanol-derived products. . *J. Catal.*, 309, 66–70.
- Bensmann A, H.-R. R. (2014). Biological methanation of hydrogen within biogas plants: a model-based feasibility study. *Appl Energy*, 413–25.
- Energimyndigheten. (den 17 09 2021). *Nyhetsarkiv*. Hämtat från <http://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2021/investering-i-klimatneutral-metanolproduktion-hos-perstorp-stods-av-energimyndigheten/>
- Ericsson, K. (2017). *Biogenic carbon dioxide as feedstock for production of chemicals and fuels: A techno-economic assessment with a European perspective*. Lund: Environmental and Energy System Studies, Lund University: Miljö- och energisystem, LTH.
- F. Graf, M. G. (2014). *Techno-Ökonomische Studie von Power-to-Gas-Konzepten*. Bonn. Hämtat från http://www.dvgw-innovation.de/fileadmin/dvgw/angebote/forschung/innovation/pdf/g3_01_12_t_p_b_d.pdf
- Fagerström, A., Grahn, D., Lundberg, S., Ghosh, S., Creaser, D., Olsson, L., . . . Hjort, A. (2021). *Large scale bio electro jet fuel production integration at CHP-plant in Östersund, Sweden*. IVL Swedish Environmental Research Institute. Report B2407. Retrieved from <https://www.ivl.se/download/18.2f05652c1775c6085c01a6/1612270805586/B2407.pdf>.
- Filip Johnsson, J. K. (2019). *Avskiljning, transport och lagring av koldioxid i Sverige - Behov av forskning och demonstration*. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola.
- Global CCS Institute. (2021). *Technology readiness and costs of CCS*. Global CCS Institute.
- Graves C, E. S. (2011). Sustainable hydrocarbon fuels by recycling CO₂ and H₂O with renewable or nuclear energy. . *Renew Sustain Energy Rev* , 1-23.
- Grond L, S. P. (2013). *Systems analyses power to gas: a technology review. Part of TKI project TKIG01038 – systems analyses power-to-gas pathways. Deliverable 1: technology review*. Groningen: KEMA Nederland B.V.
- Götz M, L. J. (2016). Renewable power-to-gas: a technological and economic review. *Renew Energy*, 1371–90.
- Hanna Karlsson, H. M. (2021). Chemical absorption of carbon dioxide in non-aqueous systems using the amine 2-amino-2-methyl-1-propanol in dimethyl sulfoxide and N-methyl-2-pyrrolidone. *Sep. Purif. Technol.* , 11, 256.
- Hannula. (2015). Co-production of synthetic fuels and district heat from biomass residues, carbon dioxide and electricity: performance and cost analysis. *Biomass Bioenergy*, 26–46.
- IEA. (2021). *About CCUS*. Hämtat från <https://www.iea.org/reports/about-ccus>
- Leonzio., G. (2018). Methanol Synthesis: Optimal Solution for a Better Efficiency of the Process. . *Processes*, 6(20). doi:10.3390/pr6030020
- Liang, Z. R.-m.-z. (2015). Recent progress and new developments in post-combustion carbon-capture technology with amine based solvents. *Int. J. Greenh. Gas Control*, 40, 26–54. Hämtat från <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.06.017>
- Lin, Y. C. (2016). Pilot plant test of the advanced fl ash stripper for CO₂ capture. *Faraday Discuss.*, 192, 37–58. Hämtat från <https://doi.org/10.1039/c6fd00029k>
- Liquid Wind. (den 17 09 2021). *Flagships*. Hämtat från <https://www.liquidwind.se/flagships>

- Lydia Stougie, N. G. (2018). Environmental, economic and exergetic sustainability assessment of power generation from fossil and renewable energy sources, . *Int J Energy Res.*, 2916–2926.
- Mahdi Sharifzadeh, P. B. (2016). Carbon capture from pulverized coal power plant (PCPP): Solvent performance comparison at an industrial scale. *Applied Energy*, 163, 423–435.
- Matzen, M. J., Alhajji, M. H., & Demirel, Y. (2015). *Technoeconomics and Sustainability of Renewable Methanol and Ammonia Productions Using Wind Power-based Hydrogen*. Lincoln: University of Nebraska.
- Meher Sanku, H. S. (2020). Crystallization kinetics and role of equilibrium for carbon capture systems with gas-liquid-solid equilibrium: Case study of AMP in NMP solution. *Fluid Ph. Equilibria*, 112505.
- Mohseni. (2012). *Power to gas- bridging renewable electricity to the transport sector*. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology.
- Nasim Pour, P. A. (2017). A sustainability framework for bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) technologies. *Energy Procedia* , 6044 – 6056.
- Oh, H. J. (2020). Techno-economic analysis of advanced stripper configurations for post-combustion CO₂ capture amine processes. *Energy* , 206, 118164. Hämtat från <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118164>
- Olah GA, G. A. (2019). *Beyond oil and gas: the methanol economy*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Porsgaard, M. (den 15 09 2021). Personal Communication. (T. Nyberg, Intervjuare)
- Project Air. (den 17 09 2021). Hämtat från <https://projectair.se/en/news/project-air-receives-eur-30-million-from-the-swedish-energy-agency/>
- Project Air. (den 17 09 2021). *Project Air*. Hämtat från <https://projectair.se/en/how-it-works/>
- Project Air. (den 17 09 2021). *Project Air*. Hämtat från <https://projectair.se/en/news/project-air-receives-eur-30-million-from-the-swedish-energy-agency/>
- Project Air. (den 17 09 2021). *Project Air*. Hämtat från <https://projectair.se/en/what-is-projectair/>
- Ricardo R. Wanderley, D. D. (2021). From hybrid solvents to water-lean solvents – A critical and historical review. *Separation and Purification Technology* 260 , 118193.
- Rönsch, S. S. (2016). Review on methanation – From fundamentals to current projects. *Fuel*, 166, 276-296. Hämtat från <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.111>
- Selma Brynolf, M. T. (2018). Electrofuels for the transport sector: A review of production costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1887-1905.
- Sheldon., D. (2017). Methanol Production – A Technical History. A review of the last 100 years of the industrial history of methanol production and a look into the future of the industry. . *Johnson Matthey Technol. Rev.*, 61(3), 172–182.
- Shen, S. B. (2017). Energy-efficient CO₂ capture using potassium proline/ethanol solution as a phase-changing absorbent. . *Int. J. Greenh. Gas Control*, 56, 1–11. Hämtat från <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.11.011>
- Stenungsund energi. (den 17 09 2021). *Om oss – Lokalt producerad fjärrvärme som tar tillvara energin och skapar ett hållbart samhälle*. . Hämtat från <https://stenungsundsenergi.se/om-oss/>
- Sundström, K. (den 25 08 2021). Personlig kontakt. (T. Nyberg, Intervjuare)
- Sweco. (2021). *Samrådsunderlag – Tillståndsansökan enligt 9 kap. miljöbalken för anläggning för produktion av e-metanol i Örnsköldsviks kommun, Västernorrlands län*. . Sweco. Hämtat från <https://static1.squarespace.com/static/5e8dd7bd5994173d6a216b14/t/60a3c9916>

- ed28d32eb625889/1621346709548/Samra%CC%8Aadsunderlag+FlagshipONE+O%CC%88rnsko%CC%88ldsvik+rev2+2021-05-12.pdf
- Urakawa A, S. J. (2014). CO₂ to fuels. *Fuel production with heterogeneous catalysis*, 93–122.
- Wilberforce, T. O. (2020). Progress in carbon capture technology. . *Science of the total environment*.
- Winter Mortensen, A., Wenzel, H., Dalgas Rasmussen, K., Sandermann Justesen, S., Wormslev, E., & Porsgaard, M. (2019). *Nordic GTL - a pre-feasibility study on sustainable aviation fuel from biogas, hydrogen and CO₂*. Copenhagen: NISA, NIRAS, SDU.
- Vitillo, J. S. (2017). Introduction: Carbon Capture and Separation. . *Chem. Rev* , 117, 9521–9523. Hämtat från <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00403>
- Övik Energi. (den 25 08 2021). *Hörneborgsverket i Örnköldsvik – Från biobränsle till el, ånga och värme*. . Hämtat från <https://docplayer.se/4023271-Horneborgsverket-i-ornskoldsvik-fran-biobransle-till-el-anga-och-varme.html>

CCU INOM FJÄRRVÄRMESEKTORN

Projektet är en mindre kartlägningsstudie av det aktuella kunskapsläget och användning av CCU (Carbon Capture and Utilization) i fjärrvärmesektorn och nedströms användning av koldioxid. Rapporten ger också en översikt av tekniker under utveckling. Projektet är primärt baserat på tillgänglig litteratur samt tidigare publicerat och icke-publicerat material. Underlaget har kompletterats med intervjuer. Vidare ges exempel på projekt med bäring på CCU för svensk fjärrvärmesektor samt en kvalitativ hållbarhetsanalys med en diskussion om koldioxidkällans inverkan. Avslutningsvis diskuteras det övergripande valet mellan CCU och CCS (Carbon Capture and Storage) för fjärrvärmeaktörer.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se