

# Fossilfria kolväten

-eten och propen från el, vatten och koldioxid

*Ellen Palm*

---

Examensarbete 2015  
Miljö- och Energisystem  
Institutionen för Teknik och samhälle  
Lunds Tekniska Högskola





LUNDS UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

**Fossilfria kolväten**  
-eten och propen från el, vatten och koldioxid

Ellen Palm

Examensarbete

Januari 2015



Dokumentutgivare, Dokumentet kan erhållas från  LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA vid Lunds universitet Institutionen för teknik och samhälle Miljö- och energisystem Box 118 221 00 Lund Telefon: 046-222 00 00 Telefax: 046-222 86 44	Dokumentnamn
	Examensarbete
	Utgivningsdatum januari 2015
	Författare Ellen Palm

Dokumenttitel och undertitel

Fossilfria kolväten - eten och propen från el, vatten och koldioxid

Sammandrag

För att klara tvågradersmålet och minska effekterna av de pågående klimatförändringarna måste användandet av fossila råvaror minska. En av många industrier som står inför denna omställning är tillverkningen av kolväten. Studien undersöker elbehovet för fossilfri produktion av eten och propen i EU till år 2050. Tillverkningsmetoderna är baserade på fossilfri energi från el, väte från vatten och kol från koldioxid. Beroende på hur användandet och produktionen av eten och propen utvecklas skulle den fossilfria tillverkningsprocessen i EU år 2050 kräva omkring 700, 1400 eller 2100 TWh.

I mellan-scenariot motsvarar detta cirka 40% av EU:s årliga elproduktion i dagsläget. Då produktionen kräver mycket el är det snarare troligt att biomassa kommer ersätta fossilt kol i EU:s eten- och propenproduktion. Däremot kan den studerade metoden komma att bli aktuell då det uppstår elöverskott som en följd av den ökade användningen av intermittenta energikällor.

De reaktioner och processteg som undersöks är att tillverka vätgas från fastoxidselektrolys och metan genom en Sabatierreaktion. Vidare tillverkas eten genom Oxidative Coupling of Methane och propen genom Metanol-till-Propen. De processteg som använder mest el är elektrolysen och Sabatierreaktionen.

Det finns idag ingen verksamhet som producerar eten eller propen genom dessa processer, men intresset för att använda koldioxid som råvara växer. Bland annat i Europa och USA finns ett fåtal aktörer som använder koldioxid som råvara för att tillverka kolväten för plastproduktion.

Nyckelord

Fossilfria kolväten, Eten, Propen, Elektrolys, Sabatierreaktion, OCM, MTP, Plast

Sidomfång	Språk	ISRN
67	Svenska, Sammandrag på engelska	LUTFD2/TFEM--15/155092--SE + (1-67)

Organisation, The document can be obtained through LUND UNIVERSITY Department of Technology and Society Environmental and Energy Systems Studies Box 118 SE - 221 00 Lund, Sweden Telephone: int+46 46-222 00 00 Telefax: int+46 46-222 86 44	Type of document
	Master thesis
	Date of issue
	January 2015
	Author
	Ellen Palm

---

Title and subtitle

Fossil-free hydrocarbons – ethylene and propylene from electricity, water and carbon dioxide

---

Abstract

To not reach a global temperature beyond the two-degree target and to reduce the effects of the on-going climate change, it is necessary to reduce the use of fossil fuels. One of many sectors that face this challenge is the refineries and production of hydrocarbons. This study examines the electricity use for a fossil-free production of ethylene and propylene in the EU by year 2050. The manufacturing process is based on fossil-free energy from electricity, hydrogen from water and carbon from carbon dioxide. Depending on how the use and production of ethylene and propylene is developed, the production in the EU year 2050 may require around 700, 1400 or 2100 TWh annually.

In the mid scenario this corresponds to about 40% of the yearly electricity production in the EU today. Since the production requires very large quantities of electricity it is more likely that biomass will supersede today's fossil based production of ethylene and propylene. The electricity, water, and carbon dioxide based production can be used when a surplus of electricity occurs due to the increased use of intermittent energy sources.

The reactions and processes that are studied are to first produce hydrogen gas via solid oxide water electrolysis and produce methane from the Sabatier-reaction with hydrogen gas and carbon dioxide. Furthermore, ethylene is to be produced from Oxidative Coupling of Methane and propylene from Methanol-to-Propylene.

Today there is no one operating this process, but there are a few companies using carbon dioxide as a feedstock for production of polymers and plastics, which is the main field of application for ethylene and propylene.

---

Keywords

Fossil-free carbohydrates, Ethylene, Propylene, Electrolysis, Sabatier-reaction, OCM, MTP, Plastic

Number of pages	Language	ISRN
67	Swedish, English abstract	LUTFD2/TFEM--15/155092--SE + (1-67)



## Förord

Detta examensarbete om att avkarbonisera petrokemin och tillverka fossilfria kolväten har skrivits under höstterminen 2014 på avdelningen Miljö- och Energisystem, IMES, som är en del av Institutionen för Teknik och Samhälle på Lund Tekniska Högskola. Jag vill tacka alla på IMES för generositeten och vänligheten ni visat mig under terminen. Tillgången till en egen arbetsplats har verkligen varit guld värd. Jag är också tacksam för att ha fått ta del seminarier, fikor och inspirerande samtal. Ett speciellt tack till Elinor, Alexandra, Oskar och André som i olika perioder delat rum med mig.

Jag vill tacka mina vänner och familj, speciellt Saskia och Kalle som lyssnat på mig och kommit med bra input.

Till sist vill jag framföra ett stort tack till examinatorn Pål Börjesson och handledarna Lars J Nilsson och Max Åhman för att ni satsat mycket tid och resurser på mig och detta arbete.

Lund, januari 2015

Ellen Palm



# Innehållsförteckning

<b>1. INTRODUKTION</b> .....	<b>4</b>
1.1 SYFTE .....	4
1.2 AVGRÄNSNINGAR.....	4
1.3 METOD.....	5
1.4 DISPOSITION .....	6
1.5 FÖRKORTNINGAR .....	6
<b>2. BAKGRUND</b> .....	<b>7</b>
2.1 KLIMATFÖRÄNDRINGARNA .....	7
2.2 KLIMATMÅLEN INOM EU .....	8
2.3 DAGENS PETROKEMI .....	9
2.4 PLAST .....	11
2.5 ALTERNATIV PLASTPRODUKTION .....	12
2.5.1 Återvinning.....	12
2.5.2 Biobaserade plaster.....	13
<b>3. ETEN, PROPEN OCH DESS FRAMTID</b> .....	<b>14</b>
3.1 ETEN .....	14
3.2 PROPEN .....	15
3.3 ETEN- OCH PROPENANVÄNDNING ÅR 2050 .....	17
3.3.1 Scenario ett – BAU.....	17
3.3.2 Scenario två – Minskning.....	18
3.3.3 Scenario tre – Ökning.....	19
3.3.4 Sammanfattning av scenarierna.....	21
3.4 BERÄKNING AV MÄNGDEN VÄTGAS OCH KOLDIOXID .....	22
3.5 PROCESSÖVERSIKT .....	24
<b>4. ELEKTROLYS</b> .....	<b>26</b>
4.1 VAL AV METOD .....	26
4.2 ELEKTROLYSENS GRUNDER.....	26
4.3 DAGENS ELBEHOV FÖR ELEKTROLYS .....	28
4.3.1 Alkalisk elektrolys.....	28
4.3.2 Protonväxlingsmembrans elektrolys (PEM) .....	29
4.3.3 Fastoxidelektrolys (SOEC).....	30
4.4 ELBEHOV FÖR ELEKTROLYS ÅR 2050.....	31
4.5 ALTERNATIV VÄTGASPRODUKTION .....	33
<b>5. METANISERING</b> .....	<b>34</b>
5.1 VAL AV METOD .....	34
5.2 METANISERINGENS GRUNDER .....	34
5.3 DAGENS ELBEHOV VID METANISERING.....	36
5.4 ELBEHOV FÖR ELEKTROLYS SAMT METANISERING ÅR 2050 .....	38
<b>6. OXIDATIVE COUPLING OF METHANE</b> .....	<b>40</b>
6.1 VAL AV METOD .....	40
6.2 GRUNDERNA I OXIDATIVE COUPLING OF METHANE .....	40

6.3	DAGENS ANVÄNDNING AV OCM .....	42
6.4	ANVÄNDNING AV OCM ÅR 2050 .....	43
<b>7.</b>	<b>METANOL-TILL-PROPEN.....</b>	<b>46</b>
7.1	VAL AV METOD .....	46
7.2	GRUNDERNA I MTP .....	46
7.3	DAGENS ELBEHOV FÖR MTP .....	47
7.4	ELBEHOV FÖR MTP ÅR 2050 .....	48
7.5	ALTERNATIV ETEN- OCH PROPENPRODUKTION .....	49
7.5.1	<i>Fisher-Tropsch</i> .....	49
7.5.2	<i>Naturgas</i> .....	49
7.5.3	<i>Biobaserad</i> .....	49
<b>8.</b>	<b>DISKUSSION .....</b>	<b>50</b>
8.1	FÖRÄNDRINGAR AV PROCESSEN .....	50
8.2	CO <sub>2</sub> -KONFERENS.....	51
8.3	INTRESSET FÖR FOSSILFRI PLAST .....	51
<b>9.</b>	<b>SLUTSATS .....</b>	<b>53</b>
<b>10.</b>	<b>EFTERORD.....</b>	<b>55</b>
<b>11.</b>	<b>REFERENSER.....</b>	<b>56</b>
<b>APPENDIX</b>	<b>.....</b>	<b>61</b>

## Figurförteckning

Figur 1:	Koldioxidkoncentrationen i atmosfären sedan år 1958.....	7
Figur 2:	De mest konsumerade plastsorter i EU år 2012 .....	12
Figur 3:	Eten presenterat med hjälp av fyra olika strukturformler .....	14
Figur 4:	Etenproduktionen i EU sedan 2003 .....	15
Figur 5:	Propen presenterat med hjälp av fyra olika strukturformler.....	16
Figur 6:	Propenproduktionen i EU sedan 2003 .....	16
Figur 7:	De senaste tio årens etenproduktion plottat mot oljepriset .....	18
Figur 8:	Efterfrågan och produktion av petrokemikalier i EU fram till år 2050.....	21
Figur 9:	Översiktsbild av den fossilfria eten- och propenproduktionen som helhet.....	24
Figur 10:	Schematisk bild över elektrolys på laboratorieskala.....	27
Figur 11:	Sammanställning av elbehovet för att tillfredsställa den fossilfria väteproduktionen år 2050 med 2014-års teknik som visar att elbehovet varierar mellan 400-1600 TWh beroende på scenario och teknik.....	28
Figur 12:	Elbehov för vätgasproduktion för eten- och propentillverkningen i EU med 2050-års teknik. ....	33
Figur 13:	Elbehov för dagens, 2016-års och 2050-års elektrolys- och metaniseringsprocess	39
Figur 14:	Schematisk bild av en OCM-process .....	41
Figur 15:	Schematisk skiss över en planerad OCM-anläggning i Baytown, Texas. ....	42
Figur 16:	Prognos för teknikutveckling för OCM från 80-talet fram till år 2050.. ....	44
Figur 17:	Schematisk bild över propentillverkningens tre huvudsteg.....	46
Figur 18:	Totalt elbehov för en fossilfri eten- och propenproduktion i EU år 2050.....	53

## Tabellförteckning

Tabell 1: Eten- och propenproduktionen i världen år 2010 och år 2050 .....	20
Tabell 2: Den förväntade mängden eten och propen år 2050 i EU.....	21
Tabell 3: Den totala mängden koldioxid respektive vätgas som behövs för att tillfredsställa den framtida eten- och propenproduktionen i de olika scenarierna.....	23
Tabell 4: Elbehov för metanproduktion med 2014-års teknik, inklusive vätgasproduktion ...	38
Tabell 5: Metan- och elbehov för att tillfredsställa etenproduktionen med 2014-års teknik, exklusive elbehov för elektrolys och metanisering.....	43
Tabell 6: Metan- och elbehov för att tillfredsställa etenproduktionen med 2050-års teknik	45
Tabell 7: Elbehov för att tillgodose 2050-års propenproduktion i EU med 2014-års teknik, exklusive elbehov för elektrolys och metanisering.....	48
Tabell 8: Elbehov för att tillgodose 2050-års propenproduktion i EU med 2050-års teknik, exklusive elbehov för elektrolys och metanisering.....	48

# 1. Introduktion

De pågående klimatförändringarna är en av de största utmaningarna vi står inför idag. Det krävs stora omställningar inom samhällets alla sektorer för att uppnå de förändringar som krävs, en av dessa sektorer är tillverkningen av kolväten. Denna rapport beskriver en möjlig framtida ickefossil och icke-biologisk eten- och propenproduktion i det hållbara samhälle EU siktar på att vara år 2050. Metoden går ut på att bygga kolvätena genom energi från fossilfri el, väte från vatten och kol från koldioxid.

## 1.1 Syfte

Syftet är att undersöka eventuella framtida elbehov för att tillverka eten och propen på ett fossilfritt sätt. Dessutom utreds tillvägagångssätt, processer och reaktioner som är nödvändiga för att lyckas. Som slutresultat presenteras hur mycket el det krävs för att tillverka all i EU producerad eten och propen från denna ickefossila metod år 2050.

Utöver det faktiska tillvägagångssättet för att producera fossilfria kolväten, undersöks även hur petrokemin ser ut idag och förväntas utvecklas. Dessutom presenteras en omvärldsanalys av fossilfria kolväten och användandet av koldioxid som råvara.

Frågeställningarna är:

- Hur mycket el behövs för att EU år 2050 ska producera all eten och propen på ett fossilfritt sätt från el, vatten och koldioxid?
- Vilka tillvägagångssätt finns för att framställa eten och propen på ett ickefossilt sätt från el, vatten och koldioxid?

## 1.2 Avgränsningar

För att begränsa omfånget undersöks inte petrokemin i sin helhet utan begränsas till de två överlägset största petrokemikalier i världen och EU, nämligen eten och propen. I princip finns det två olika fossilfria tillverkningsalternativ för kolväten, antingen via biologiska råvaror, som socker, stärkelse etc. eller genom att tillverka eten och propen från fossilfri el, väte från vatten och kol från koldioxid. Denna studie fokuserar på det senare alternativet.

Studien handlar om den faktiska produktionen i EU, och tar inte hänsyn till eventuell nettoimport eller -export. I klimatåtaganden och färdplaner räknar man vanligtvis inte med import eller export av varor eller tjänster och de eventuella växthusgasutsläpp de skapat, utan enbart den inhemska produktionen inkluderas. Export och import av eten eller propen kommer därför inte tas med i beräkningarna, utan det är produktionen som undersöks. Idag är importen och exporten i EU ungefär lika stora, varpå situationen kan förenklas genom att säga att produktionen är lika med konsumtionen. Hur detta förhållande ser ut år 2050 beror på hur industrin reagerar på kommande klimatåtaganden, energimarknadens utveckling och framtida råvarupris.

Syftet är att uppskatta hur mycket el som behövs för att tillgodose den huvudsakliga petrokemikalieproduktion på ett fossilfritt sätt år 2050. Resultatet handlar inte i första hand om precision, utan snarare om en översikt. Elbehovet presenteras med hjälp av tre scenarier med utgångspunkt i olika aspekter av framtida användning, effektivisering och produktion.

Det fysiska avgränsningsområdet för eten- och propenproduktionen är inte Europa i sin helhet utan representeras av EU-27, vilket består av de 27 länder som var medlemmar i EU innan sommaren 2013<sup>1</sup>. Antalet länder som innefattas av EU kommer sannolikt öka fram till år 2050, men denna förändring och den eventuella produktionsförändring det skulle innebära tas inte med i beräkningarna. När det står EU i rapporten syftar detta således på EU-27.

SI-enheten för energi är Joule [J], men elbehovet kommer att presenteras i TWh. Detta för att i allmänhet presenteras förbrukad el i TWh, varpå enheten är lättare att relatera till andra elanvändningsdata.

Undersökningsområden som inte innefattas i studien men som skulle vara intressanta att undersöka är hur koldioxid ska fångas in och vilken källa den kan komma ifrån. Det vore även intressant att inkludera andra stora organiska baskemikalier som metanol, bensen och blandade xylener och undersöka möjligheterna att även tillverka dessa fossilfritt. De biprodukter som uppstår i tillverkningen skulle kunna användas som råvara i andra steg i processen, vilket skulle minska energi- och råvaruanvändningen. I studien inkluderas inte dessa möjliga energi- och resursvinster.

### **1.3 Metod**

Studien grundar sig på en litteraturstudie av vetenskapliga artiklar samt framtidsutsikter från olika aktörer, så som industrin, EU och FN. I första ledet handlade det om att kartlägga dagens eten- och propentillverkningen, men i huvudsak har reaktionerna och processerna som krävs för att producera eten och propen studerats. Områden som lagstiftning och plastanvändning har också studerats. Dessutom har plast som material och biobaserad plast undersökts. Då många av processtegen är under utveckling har artiklarna valts i stor utsträckning baserat på publiceringsår. Vissa artiklar är väl citerade medan andra inte är det, eller hunnit bli det.

För att sätta arbetet i en kontext har ett besök på en internationell CO<sub>2</sub>-konferens kring att använda koldioxid som råmaterial inkluderats i arbetet. Konferensen, 3<sup>rd</sup> Conference on Carbon Dioxide as Feedstock for Chemistry and Polymers, gick av stapeln den 3-4 december i Essen, Tyskland. På CO<sub>2</sub>-konferensen, som den hädanefter kommer refereras till, deltog världens ledande experter och företag inom det relativt nya ämnet och forskningsområdet, nämligen att använda koldioxid som råvara och därigenom förändra synen på koldioxid från oönskad växthusgas till användbar råvara.

---

<sup>1</sup> Detta trots att EU idag består av 28 medlemsländer sedan Kroatien blev medlem i juli år 2013. Anledningen till avgränsningen EU-27 beror på att Kroatiens produktionsstatistik inte fanns i EU:s offentliga statistik vid undersökningstillfället. Kroatien producerade dock ingen eten eller propen år 2013, varpå eventuella nya uppgifter inte antas påverka den totala EU produktionen.

## 1.4 Disposition

Efter introduktionen inleds rapporten med kapitel två som beskriver bakgrunden till arbetet. Kapitel tre är en beskrivning av eten och propen, produktionen i dagsläget, deras egenskaper och användningsområden. Den framtida eten- och propenanvändningen presenteras i tre scenarier, och är sedan utgångspunkt för energi- och materielbehovet i resten av arbetet, även en översikt av processen presenteras. I kapitel fyra beskrivs elektrolysen som är det första steget från el till eten och propen, där vätgas skapas genom klyvning av vatten. Kapitel fem beskriver reaktionen mellan vätgas och koldioxid genom Sabatierreaktionen med slutprodukten metan. De två sista processtegen behandlas i kapitel sex och sju där eten- och propentillverkningen beskrivs via OCM, Oxidative Coupling of Methane, och MTP, metanol-till-propen. I varje processteg presenteras elbehovet per producerad produkt samt de framtida effektivitetsförbättringarna och således det förväntade elbehovet år 2050.

Efter processbeskrivningarna diskuteras processen, CO<sub>2</sub>-konferensen och intresset för fossilfri plast i kapitel 8, resultatet presenteras i kapitel 9 och sist lämnar författaren ett efterord i kapitel 10.

Rapporten innehåller också ett appendix som är en omvärldsanalys av några företag som idag använder koldioxid som råvara.

## 1.5 Förkortningar

I listan nedanför presenteras förkortningar som förekommer i examensarbetet.

CCS	<i>Carbon Capture and Storage/ Sequestration.</i> Infångning av koldioxid från exempelvis kolkraftverk och sedan pumpas ner och lagras i berggrunden.
CCU	<i>Carbon Capture and Use.</i> Att använda koldioxid som råvara, istället för att slutförvara den.
CEFIC	<i>The European Chemical Industry Council.</i> Den europeiska kemikalieindustrins samarbetsorganisation.
DME	Dimetyleter
IEA	<i>International Energy Agency.</i> Internationella energimyndigheten.
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change.</i> FN:s klimatpanel.
MTP	<i>Methanol-to-propylene.</i> Kemisk process som omvandlar metanol till propen.
OCM	<i>Oxidative Coupling of Methane.</i> Kemisk process som omvandlar metan till bland annat eten.
PE	Polyeten. Världens mest tillverkade plast.
PEM	<i>Proton Exchange/ Electrolyte Membrane.</i> En elektrolysmetod.
PP	Polypropen. Världens näst mest tillverkade plast.
PTG	<i>Power-to-Gas.</i> Samlingsnamn för att omvandla el till gas.
PVC	<i>Polyvinylklorid.</i> En plast bestående av eten.
SOEC	<i>Solid Oxide Electrolyzer Cell.</i> En elektrolysmetod.

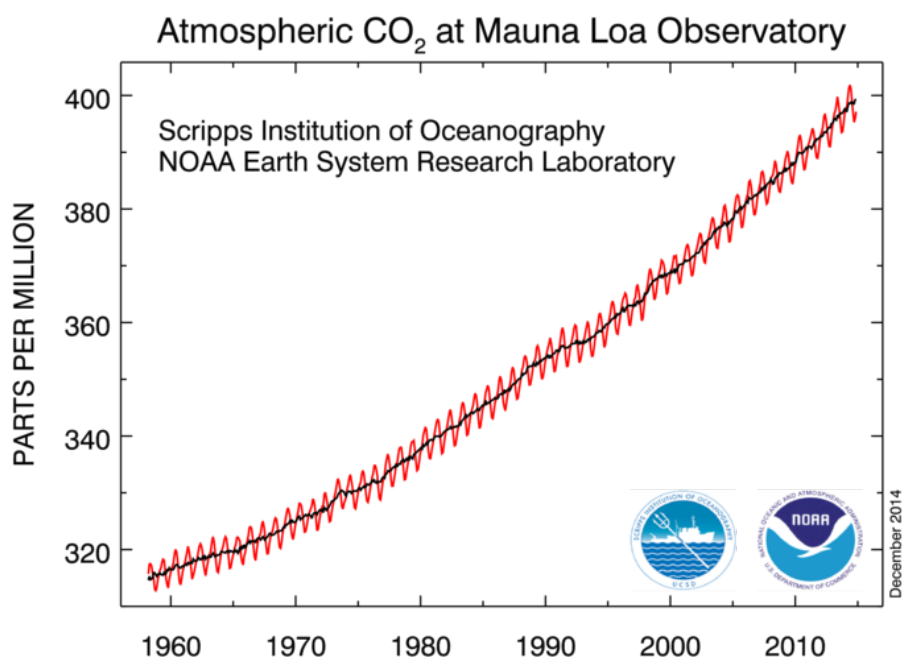
## 2. Bakgrund

De pågående klimatförändringarna är en av de största utmaningarna vi står inför idag. För att uppnå ett samhälle där vi kan tillgodose våra behov utan att äventyra framtida generationers möjlighet att tillgodose sina har EU helt enligt definitionen av hållbarhet, förslagit en färdplan mot år 2050 där växthusgaserna ska minska drastiskt (EU-kommissionen, 2011). Det krävs en rad stora förändringar inom samhällets alla sektorer för att uppnå färdplanen, en av dessa sektorer är petrokemins tillverkning av kolväten.

### 2.1 Klimatförändringarna

Enligt sammanställningen av de senaste sex årens klimatforskning som gjorts av världens ledande experter inom området, FN:s klimatpanel IPCC, är klimatförändringarna ett faktum som redan påverkar jordens klimat. Sammanställningen från IPCC talar om att det på alla jordens kontinenter har registrerats klimatförändringar. Effekter som uppvisats är bland annat: varmare atmosfär och världshav, mindre is- och snötäcken samt högre havsvattennivåer. Detta beror till stor del på de höga halterna av växthusgaser som finns i atmosfären. Förändringarna ökar och beror med största sannolikhet på människans aktiviteter och utsläpp av växthusgaser. Däremot säger rapporten att om växthusgasutsläppen minskar drastiskt inom en snar framtid är det fortfarande möjligt att lindra effekterna och nå det kritiska tvågradersmålet (IPCC, 2014).

Koldioxid är den största växthusgasen till både volym och effekt, idag uppmäter den koncentrationsnivåer som inte uppmäts på över 800 000 år (IPCC, 2014). Sedan slutet av 50-talet har atmosfärens koldioxidkoncentration mätts på en station på Hawaii. I Figur 1 visar mätningarna därifrån hur koldioxidkoncentrationen fluktuerat med årstiderna och konstant ökat de senaste 55 åren. Grafen visar att år 1960 varierade koldioxidkoncentrationen mellan 313-320 ppm och år 2014 låg koldioxidkoncentrationen på mellan 395-402 ppm, vilket är en ökning på cirka 80 ppm (NOAA, 2014).



Figur 1: Koldioxidkoncentrationen i atmosfären sedan år 1958 (NOAA, 2014)

Den ökade koldioxidkoncentrationen i atmosfären beror till största del på det mänskliga ohållbara användandet av fossila råvaror. För att lyckas minska klimatförändringarnas effekt måste därför det användandet minska. Hur stora minskningarna blir beror till stor del på de globala klimatförhandlingarna, där alla länder kommer överens om ett klimatavtal som ger varje land ett klimatåtagande anpassat efter landets situation och förutsättningar. I det senaste stora klimatavtalet, Kyotoprotokollet, fick de länder som då ansågs industrialiserade åtaganden om utsläppsminskningar och mätning av sina utsläpp, medan de som inte ansågs industrialiserade enbart fick åtaganden om att mäta sina utsläpp. Då världens länder förändrats sedan dess, och Kyotoprotokollet inte lett till de växthusgasminskningar man hoppats på är det nu dags för ett nytt globalt klimatavtal. Nästa stora och kanske avgörande klimatmöte sker i Paris i november år 2015, där planen är att ett nytt klimatavtal ska skrivas under av alla FN:s medlemsländer.

## **2.2 Klimatmålen inom EU**

De klimatavtal som skrivs under på FN:s klimatmöten ligger delvis till grund för EU:s egna klimatåtaganden. Varje land inom EU tilldelas egna klimatmål, men de sammanställs och ska tillsammans uppfylla EU:s målsättningar och krav. Fram till år 2020 är det 20-20-20- paketet som styr. Paketet har som målsättning att EU till år 2020 ska ha minskat sina växthusgasutsläpp med 20% jämfört med år 1990, att minst 20% av energin ska vara förnyelsebar och att energieffektiviteten ska ha ökat med 20% (EU-kommissionen).

I oktober år 2014 beslutades om klimat- och energipolitiken i EU fram till år 2030, där EU-kommissionen och europeiska rådet kom överens om de framtida målen. Målsättningen är att minska utsläppen av växthusgaser med 40% jämfört med år 1990, att minst 27% av energin ska vara förnyelsebar och att energieffektiviteten ska öka med minst 27%. De två första målen är bindande på EU-nivå, men målet om energieffektivitet är vägledande och ska ses över igen senast år 2020. Kommissionens ursprungliga förslag hade högre satta mål, men efter att förslaget diskuterats i rådet fattades beslut om de mål som presenterats ovan (European Council, 2014). Båda dessa två strategier för år 2020 och år 2030 leder fram till den stora färdplanen till år 2050 där EU föreslår en minskning på minst 80% av växthusgaserna jämfört med år 1990. Den sektor som ska minska mest är energisektorn, som år 1990 stod för mer än 20% av växthusgasutsläppen men som år 2050 föreslås ha ett nära-noll utsläpp. Gällande den petrokemiska industrin talar färdplanen något tvetydigt om att behålla den inhemska europeiska raffineringen av olja för att finnas kvar på den globala oljemarknaden och därigenom anpassa kapacitetsnivån för den ekonomiska verkligheten som råder (EU-kommissionen, 2011).

Som en del av EU:s övergripande klimatmål finns andra åtaganden för att minska utsläppen av växthusgaser. Bland annat den europeiska handeln med utsläppsrätter, energimärkning och effektivitetskrav på vitvaror samt frivilliga miljömärkningar som EMAS och EU Ecolabel. Detta för att EU med dess industrier och medborgare ska slå om till ett fossiloberoende och hållbart samhälle. Förhoppningen är att denna avkarboniseringen av samhället och industrin ska leda till bättre energisystem som bidrar till nya stora investeringar i den europeiska ekonomin. Då mindre olja förbränns minskar behovet och beroendet av oljeimporten samt att luftkvaliteten ökar, vilket i sin tur leder till bättre folkhälsa och minskade sjukvårdskostnader. Minskningarna av växthusgaser är därför inte enbart till för att minska klimatförändringarna



utan handlar även om att förbättra det ekonomiska och sociala läget i Europa (EU-kommissionen, 2011).

### **2.3 Dagens petrokemi**

Petrokemi består i att raffinera råolja till exempelvis asfalt, bensen och lättare kolväten. Dagens petrokemi i EU är beroende av importerade fossila råvaror som olja och naturgas, vilket industrin och beslutsfattarna räknar med att den ska fortsätta vara de nästkommande decennierna (Cefic, 2013b). Merparten av produkterna av den olja som raffineras idag används som bränsle för transport eller uppvärmning, men 4-8% går till att producera kemikalier. Siffran varierar för beroende på hur man räknar. Om bara materialanvändandet inkluderas är det 4% av oljan som blir kemikalier, men om den olja som används i form av energi i dessa processer inkluderas stiger siffran till omkring 8% (Hopewell, Dvorak, & Kosior, 2009). Det är sju baskemikalierna som tillverkas i petrokemin: metanol, olefinerna eten, propen och butadien samt aromaterna xylen, bensen och toluen. Dessa används sedan i en stor variation av olika användningsområden och slutprodukter. I huvudsak används de för tillverkning av plaster, men också till syntetfiber, lim, färg, lösningsmedel och bekämpningsmedel. De två mest tillverkade kolvätena är eten och propen, dessa är båda viktiga baskemikalier inom den organiska kemin framförallt för plasttillverkningen. Eten och propen står tillsammans för 55% av den totala mängden baskemikalier i världen. Av de 360 Mton olefiner, aromater samt metanol som produceras globalt står eten och propen för nästan 200 Mton (UNEP, 2013).

Det finns två anledningar att undersöka en fossilfri kolväteproduktion. Det först är att då planen är ett samhälle med nollutsläpp betyder det att alla sektorer ska vara fossilfria, även petrokemin och baskemikalierna. Därför måste råvaran bytas ut mot en icke-fossil. Den andra anledningen är en indirekt effekt av klimatåtaganden. Då bensen- och dieselanvändandet kommer minska i samhället kommer även mängden råolja som raffineras minska. Dagens petrokemikalier produceras av en biprodukt av raffineringen och därför leder minskad raffinering till mindre råvara för att tillverka fossilbaserade baskemikalier. Av båda dessa två anledningar blir det nödvändigt att finna alternativa ickefossila och hållbara sätt att tillverka eten och propen. Beroende på vilken effekt som sker först kan den ickefossila kolväteproduktionen komma att underlätta och bidra till genomförandet av EU:s färdplan till år 2050.

Då merparten av de europeiska kolvätena används i plastindustrin fokuserar följande text på denna. Den europeiska plastindustrin har ännu inte helt återhämtat sig från den ekonomiska krisen år 2009 och under hösten år 2014 har Europas plastindustris två största branschorganisationer gått samman och formulerat ett manifest till beslutsfattare inom EU med önskan om stöd. Aktörerna som gått samman är branschorganisationerna PlasticEurope och European Plastics Converters (EuPC) som tillsammans företräder stora delar av Europas plastindustri. Plastindustrins hävdar att stödet är nödvändigt för att fortsätta utveckla plastindustrin och på så sätt driva den europeiska tillverkningsindustrins ekonomi, tillika Europas ekonomi framåt. De påstår vidare att trots att tillverkningsindustrin är energiintensiv och använder fossila råvaror är den en del i lösningen mot det hållbara samhället, och att i synnerhet plastindustrin spelar en viktig roll. Bland annat säger även en representant från EU-kommissionen i manifestet att Europa behöver en stark industri och att det behövs mer investeringar i tillverkningsindustrin. Kommissionen har som mål att 20% av BNP år 2020

ska komma från tillverkningsindustrin, en siffra som kan jämföras med dagens 15,3% (TheEuropeanPlasticsIndustry, 2014).

Sedan den senaste ekonomiska krisens har Europa förlorat 3,8 miljoner jobb bara inom tillverkningsindustrin. Plastindustrins branschorganisationer hävdar att då den plast de producerar används i många andra tillverkningsindustrier, finns det en multiplikatoreffekt på jobb inom plastindustrin. I det ovan nämnda manifestet till beslutsfattare från plastindustrins branschorganisationer påstår de att för varje nytt jobb inom plastindustrin bildas nästan tre nya jobb i den övriga ekonomin. Med detta som grund och en oro över att det blir dyrt för plastindustrin att anpassa sig till de nya klimatavtalen ber de om stöd i följande fem kategorier: [I] försäkringen om konkurrenskraftiga priser på energi och råvaror, [II] främjande av högre utbildning med inriktning mot plastindustrin, [III] stimulering av investeringar i innovationer, [IV] kompletterade föreskrifter som är förenliga med industrins verksamhet samt [V] ett involverande av plastindustrin i EU:s arbete för hållbar utveckling bland annat genom att inkluderas i EU:s arbete kring cirkulär ekonomi (TheEuropeanPlasticsIndustry, 2014).

### **Faktaruta - Petrokemin i Sverige**

I Sverige finns det bara en producent av både eten och propen, den ligger i Stenungsund och drivs av Borealis. Verksamheten tycks inte, som plastindustrin i Europa, hindras av den svaga konjunkturen eller osäkra marknaden och håller just nu på att genomföra en mångmiljonuppdatering av en av sina anläggningar.

I Stenungsund finns fem kemiföretag: Aga, AkzoNobel, Borealis, Ineos och Perstorp. Av dem är det Borealis, Ineos och Perstorp som verkar inom petrokemin, då Aga och AkzoNobel tillverkar gas respektive färg och lim. Alla fem kemiföretagen i Stenungsund har gått samman och satt upp målet Hållbar Kemi 2030, som säger att de strävar efter att år 2030 bara använda förnyelsebara råvaror och energi. Bland annat talar planen även om att starta upp en återvinning av plaster där råvaran går in i nya produkter på plats (Kemiföretagen i Stenungsund, 2014).

Borealis driver en polyetenanläggning och den enda krackeranläggningen i Sverige. Borealis är registrerat till miljöledningsstandarden ISO 14 001 och har antagit sig att årligen publicera en miljörapport. I den har de rapporterat att produktionen år 2013 låg inom den normala variationen på en etenproduktion på cirka 600 kton och en propenproduktion på cirka 200 kton. En del eten säljer de, men den del polymeriserar de själva. Polyetenproduktion var år 2013 cirka 750 kton. Verksamhetsgrannen Ineos använder eten som baskemikalie och har Europas största polyvinylklorid tillverkning (PVC). Företagen driver sin verksamhet till viss del i symbios, för när Borealis renat sitt process- och dagvatten leds det till Ineos anläggning där det späds med deras utgående kylarvatten innan det släpps ut i havet. Perstorpskoncernen tillverkar specialkemikalier och har även dem ett nära samarbete med Borealis. Bland annat levereras överskottet av bränngas som ibland uppstår i Borealis kracker till Perstorp där den metanrika gasen används som råvara (Borealis, 2013).

## 2.4 *Plast*

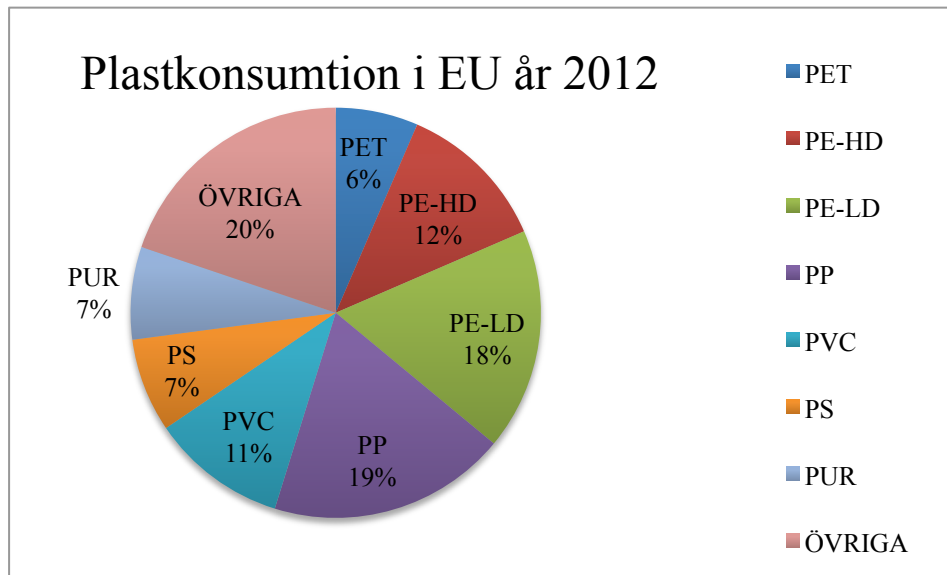
Plaster består av långa kedjor av kolväten, så kallade kolkedjor eller polymerer. Kolväten och plast är alltså inte samma sak. Dessa kolkedjor som bygger upp plast bildas av att mindre kolväten, monomerer, polymeriseras samman till polymerer (O'dian, 2004). Exempel på monomerer är just eten och propen som denna studie handlar om. Eten, propen och andra monomerer som är grunden till de polymerer som bildar plaster kommer från raffinering av råolja, man räknar med att cirka 4% av den råolja som utvinns används som material till plasttillverkning och ytterligare cirka 4% för energianvändning (Hopewell et al., 2009).

Plast som material har många fördelar, så som att det är lätt, formbart, starkt, ljusresistent, inte leder el och är billigt, men det finns också problem med plast. Det är i huvudsak tre problem det talas om: att det kommer från en fossil råvara, nedskräpningen som bildas till följd av det stora plastanvändandet och bristande avfallshanteringen samt problem med gifter från plaster som kan påverka människan och miljön negativt.

Ett problem som fått mycket uppmärksamhet inte minst under hösten 2014 är mikroplaster. Mikroplasterna kan komma från plast som sönderdelas eller från skönhetsprodukter som tandkräm och tvål. I första hand är det ett nedskräpningsproblem men mikroplasten äts även upp av fiskar som i sin tur äts upp av rovdjur och eventuellt till slut av oss människor. Man vet ännu inte vad detta har för effekter, men man ser det som ett problem att mikroplastskoncentrationen ökar i haven. En nyhet inom området är att man nu ser förändringen även i svenska vatten, tidigare trodde man att det var ett problem i Stilla Havet, Atlanten och Indiska Oceanen, men nu ser man det även tydligt både på den svenska väst- och östkusten (Magnusson & Wahlberg, 2014; Nyström, 2014).

Då det finns många sätt att kombinera olika kolväten finns det också många plaster, men de plaster som produceras och konsumeras idag kategoriseras i sju plastsorter. Den vanligaste plasten är polyeten, PE, som uppfanns år 1933 och används i plastpåsar, slangar och rör (Andrady & Neal, 2009). PE delas in i två huvudgrupper, hög- och lågdensitetspolyeten. Hög densitet ger styvare och tätare plast medan låg densitet ger starkare och mer genomskinlig plast. Högdensitetspolyeten HD-PE, High Density Poly Ethene, består av långa raka kolkedjor som innehåller få förgreningar. Lågdensitetspolyeten finns i två kategorier, lågdensitetspolyeten och linjär lågdensitetspolyeten, LD-PE Low Density Poly Ethene och LLD-PE Linjär Low Density Poly Ethene. LD-PE innehåller långa och många förgreningar, medan LLD-PE är har en förhållandevis rak struktur med få och korta förgreningar (Polynova, 2014).

Den näst vanligaste plasten är polypropen (PP) som uppfanns år 1954 och används till bildelar, rep och förpackningar samt fiber till mattor och vävar. Sammanlagt konsumeras i EU runt 100 kg plast per person och år (Andrady & Neal, 2009). Utöver PE och PP, som tillsammans står för nästan 50% av EU:s plastkonsumtion, se Figur 2, finns ytterligare fyra vanliga plaster. I fallande storleksordning är det polyvinylklorid (PVC), polystyren (PS), polyuretan (PUR) och polyetentereftalat (PET). Notera att Figur 2 visar fördelningen av plastkonsumtionen i EU och inte plastproduktionen.



Figur 2: De mest konsumerade plastsorter i EU år 2012. Grafen visar att PP är den enskilt största gruppen på 19%, men slår man ihop PE-HD och PE-LD är den störst, 30% av all konsumerad plast. Källa: (PlasticsEurope, 2013)

## 2.5 Alternativ plastproduktion

Att byta ut råvaran för kolväteproduktion från olja till el, vatten och koldioxid minskar växthusgasutsläppen för plast. Andra sätt att minska klimatpåverkan av plast kan uppnås genom ökad återvinning eller genom att använda biomassa som råvara.

### 2.5.1 Återvinning

Avfallshanteringen och återvinningen ser väldigt olika ut i olika delar av EU. Av den plast som kommer ut på marknaden materialåtervinns idag cirka 26% (PlasticsEurope, 2013), motsvarande siffra i Sverige är 37% (Förpacknings&Tidningsinsamlingen, 2014). På EU-nivå går den plast som inte återvinns till lika stora delar till förbränning och deponi. I Sverige går cirka 4% av plasten till deponi medan cirka 60% går till avfallsförbränningen som i Sverige producerar både el och fjärrvärme (PlasticsEurope, 2013). Skulle materialåtervinningsandelen öka samt effektiviteten och renheten i den återvunna plasten öka, kan mängden plast som tillverkas med jungfrulig råvara minska. Oavsett vilken råvara som använts i tillverkningen av plasten, bidrar återvinning till den cirkulära ekonomin. Detta talar för en minskad tillverkning av plast från ny råvara i framtiden. Då den vanligaste avfallshanteringen i EU idag är att plast läggs på deponi eller förbränns finns det mycket oanvända resurser att använda (Ren, Patel, & Blok, 2008).

En återvinnings- och tillverkningsmetod som undersöktes i slutet av 1990-talet var att använda plastavfall som råvara till nafta, som sen omvandlades till kolväte igen. Nafta är en blandning av lättare kolväten som används i kolväteproduktion. Tekniken gick ut på att plasten omvandlades till nafta genom kondensering, pyrolys och ett antal separationsprocesser. Den nya naftan användes sedan som råmaterial för tillverkning av nya plaster, framförallt PP och PE. Tekniken utvecklades i Tyskland, men projektet lades ner på grund av dålig lönsamhet och kom aldrig att användas på kommersiell skala (Heyde, Kremer, Ebert, Fleischer, & Holley, 1999).

## 2.5.2 Biobaserade plaster

Biobaserade polymerer upptäcktes redan på 1860-talet, varpå det sedan vidareutvecklades under 1930- och 1940-talet. Produkterna och polymererna kom dock aldrig att produceras på industriell nivå till stor del beroende på den genomslagskraft som råoljan och de fossila polymererna hade under 1950-talet. Nu när medvetenheten om problematiken med att använda fossila råvaror och intresset för åtgärder som kan minska de pågående klimatförändringarna har ökat, har det på senare år blivit intressant igen att studera vidare på de biobaserade polymererna.

Biobaserade plaster kallas även bioplaster, vilket är ett namn vars definition kan leda till förvirring. I definitionen av bioplaster ingår både biobaserade plaster, biologiskt nedbrytbara plaster och plaster som är bådadera. En biologiskt nedbrytbar plast är inte nödvändigtvis tillverkad av ett biologiskt material, utan kan även vara fossilbaserad. Både Nordisk Bioplastförening och European Bioplastics använder denna något vilseledande definition, där prefixet bio- leder en att tro att det är biobaserat. Denna rapport använder istället begreppet biobaserade plaster, oavsett om de är biologiskt nedbrytbara eller inte och syftar alltså enbart på att råvaran är biologisk och därmed fossilfri.

Marknaden för biobaserade plaster i Europa har växt med nära 50% mellan åren 2003-2007, och den fortsätter växa. Den globala produktionen av biobaserade plaster väntas öka och år 2020 vara mellan 1,5-4,5 kton/år. De fyra vanligaste produktionsmetoderna för att tillverka biobaserade plast är, presenterade i fallande storleksordning: stärkelseplast, plast som produceras via mjölksyra från fermenterat socker, biobaserad polyeten och plaster från vegetabiliska oljor (Shen, Haufe, & Patel, 2009).

Den största tillverkaren idag inom biobaserad polyeten ligger i Brasilien och tillverkar sin plast från sockerrör. De två största tillverkarna är företagen Dow and Crystalsev och Braskem (Shen et al., 2009). I Sverige tillverkas ännu ingen biobaserad plast, men företaget Triogreen har tillsammans med Tetra Pak under våren år 2014 lanserat skruvkorkar som tillverkats med denna ickefossila och biobaserade polyeten (Triogreen, 2014). I oktober 2014 lanserade de också en mjölkförpackning helt gjord på förnyelsebara råvaror, i vilken även plasten runt kartongen var gjord av biobaserad polyeten (TetraPak, 2014).

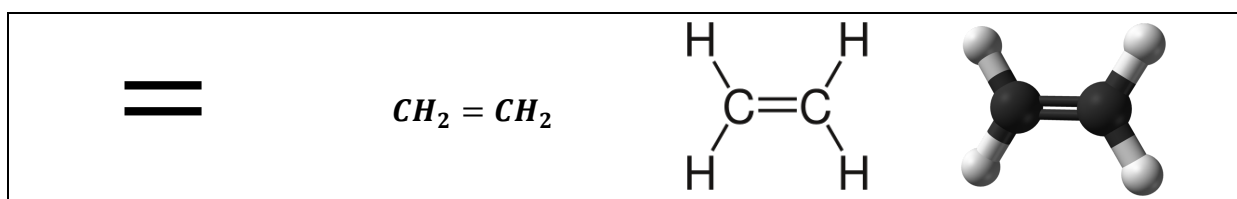
Ett sista exempel från företagsvärlden är att Ikea under hösten 2014 meddelade att all plast i heminredningsprodukter ska vara återvunnen plast eller komma från förnyelsebara råvaror. Omställningen ska ske under de kommande 5 åren och inkluderar de produkter som mestadels består av plast, som diskborstar, trädgårdsmöbler och förvaringslådor (Ikea, 2014).

### 3. Eten, propen och dess framtid

Världens och Europas två mest producerade kolväten är eten och propen. Globalt produceras det årligen 123 Mton eten och 75 Mton propen (UNEP, 2013). Här ges grundläggande kunskap om dessa och det presenteras en uppskattning av den framtida eten- och propenproduktionen.

#### 3.1 Eten

Eten är den mest tillverkade och använda baskemikalien i världen. Det är ett rakt kolväte som innehåller två kolatomer, en dubbelbindning och fyra kolatomer,  $C_2H_4$ . Eten är den enklaste av alla alkener, eller olefiner som det även kallas. Det är en färglös gas med svag lukt i rumstemperatur som är explosiv och brandfarlig. Nedanför i Figur 3 presenteras eten genom fyra olika strukturformler.



Figur 3: Eten presenterat med hjälp av fyra olika strukturformler

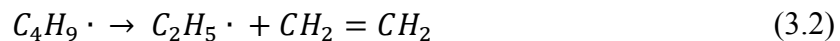
Eten används framförallt som råmaterial till plaster, i huvudsak till PE och till viss del PVC. PE är som sagt världens mest använda plast och finns i leksaker, flaskor, förpackningar och plastpåsar, mestadels sker användandet i engångsartiklar. PVC är en hårdare plast och används till exempel i fasader, fönsterkarmar och plaströr. Utöver att fungera som råvara till plast används eten även som råvara till kylmedel och textilfiber (UNEP, 2013).

I dagslägen framställs eten från fossila råvaror som naturgas eller nafta via termisk krackning. Krackning kommer från engelskans cracking som betyder splittra/ slå sönder och innebär att man delar längre kolväten till kortare. För att gynna etenbildningen i den termiska krackningen tillsätts vattenånga. I korthet kan det beskrivas med att enkelbundna kolväten, nafta bestående av butan, etan etc., bildar fria elektroner som bildar dubbelbindningar, och därmed alkener. Krackning kan initieras med nästan vilket kolväte som helst, men i Reaktion 3.1 nedan utgår det från oktan. Oktanen spjälkas upp i två radikaler, två butanmolekyler med en fri elektron (Berreni & Wang, 2011). Standardbeteckningen för radikaler är en punkt bredvid föreningen och används även här.



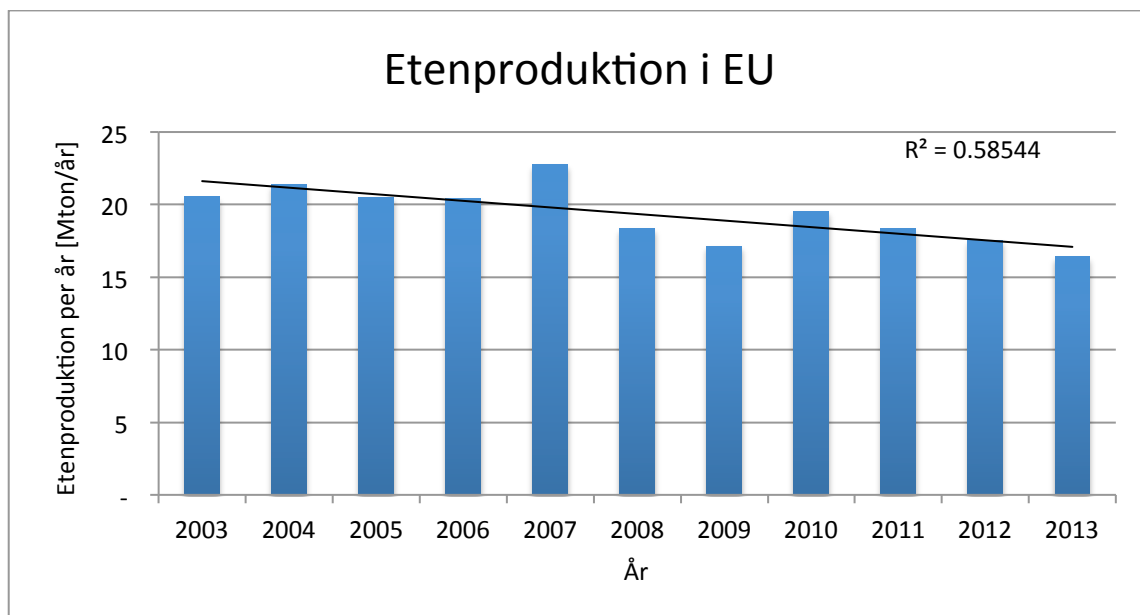
Den fria elektronen reagerar och frigörs från kolvätet varpå en alken är bildad, se Reaktion 3.2. Den tillsatta vattenången gynnar etenbildningen genom att radikalernas koncentration minskar vilket bidrar till minskad återförening, det vill säga ökad avknoppning och

etenbildning. Ytterligare en etenmolekyl kan skapas av den kvarstående radikalen genom att den fria elektronen och det extra vätet kan reagera med ett annat kolväte.



Ickefossil och naturlig framställning av eten förekommer också, men i mycket små mängder. Det sker naturligt genom biosyntes i frukt. Utsöndringen påbörjas efter att frukten skördats och har som funktion att påskynda fruktens mognadsprocess. Fruktar i dess närhet kan också påverkas, men utsöndringen sker i mycket liten skala och det är inte rimligt att samla in den. Gasutsöndringen är mellan 100-300 ml eten/g frukt/timme (Hoffman & Yang, 1980).

Produktionen av eten är den överlägset största av alla kolväten, i Figur 4 visas produktionen i EU sedan år 2003 och framåt. Produktionen har de senaste 10 åren varierat mellan 16-23 Mton/år. Produktionen hade en nedgång vid den ekonomiska krisen åren 2008-2009, och har sedan dess legat på en något lägre nivå än innan. År 2013 låg nivån på 16 Mton (Eurostat, 2014). Den infogade trendlinjen visar att det funnits en svagt nedåtgående trend, men  $R^2$ -värdet är lågt, varpå det inte går att säga med säkerhet.

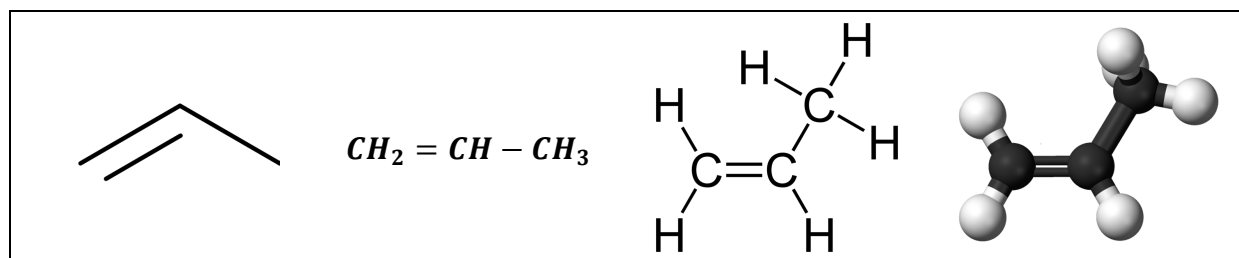


Figur 4: Etenproduktionen i EU sedan 2003 [Mton/år]. Källa: (Eurostat, 2014)

Etenproduktionen sker i 15 av EU:s medlemsländer och den största produktionen sker i Frankrike och Tyskland. Tillsammans står de för hälften av all etenproduktion, medan den totala svenska etenproduktionen i Stenungsund står för knappa 6% (Borealis, 2013; Eurostat, 2014).

### 3.2 Propen

Propen är den näst mest tillverkade baskemikalien i världen med en årlig produktionsmängd på 75 Mton (UNEP, 2013). Det är ett kolväte som innehåller tre kolatomer, en dubbelbindning och sex kolatomer,  $C_3H_6$ . Propen är den näst enklaste av alla alkener, eller olefiner. Det är en färglös, illaluktande och brännbar gas i rumstemperatur. I Figur 5 nedanför representeras propen av fyra olika strukturformler.

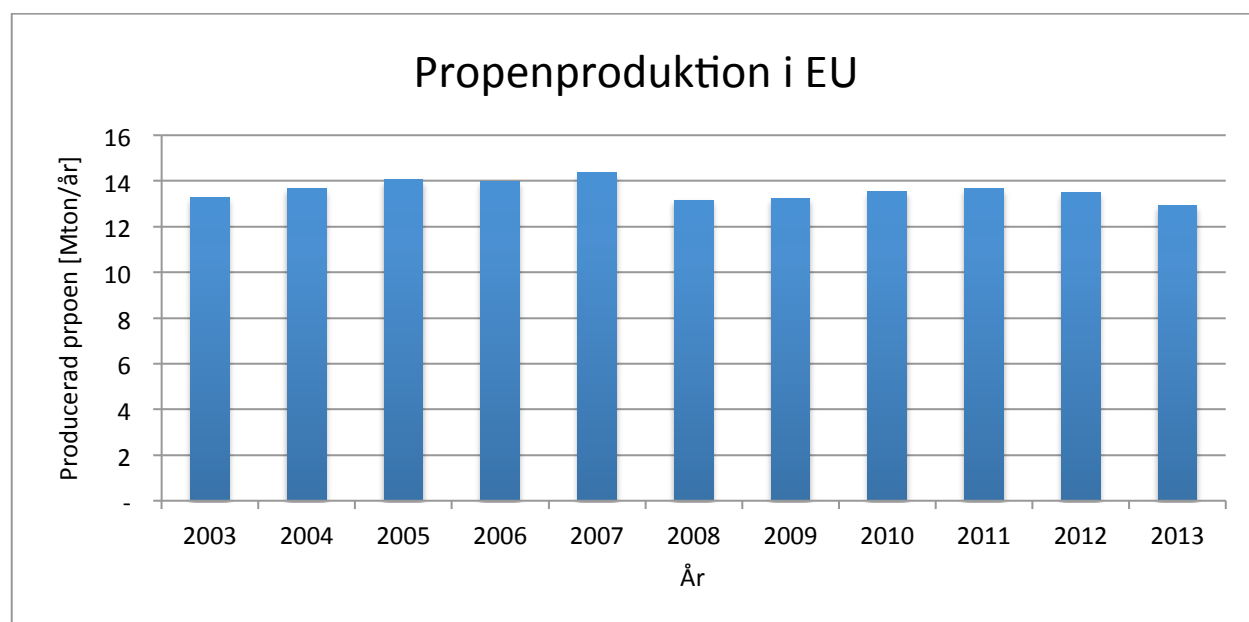


Figur 5: Propen presenterat med hjälp av fyra olika strukturformler

Propen används, i likhet med eten, framförallt som råvara till plast. Den används i huvudsak för den näst största plastkategorin PP som används till bildelar, rep och förpackningar samt fiber till mattor och vävar. Propen används även till andra typer av plaster för möbler och båtar. Utöver plast används propen som råvara till lösningsmedel, färger och smink (UNEP, 2013).

Propen framställs, i likhet med eten, från fossila råvaror som naturgas eller råolja via termisk krackning. Reaktionerna sker analogt som krackningen för eten, se Reaktion 3.1-3.2. Skillnaden är att vattenånga inte tillsätts, vilket leder till mindre avknoppning och således bildas det längre kolvätaet propen.

I Figur 6 visas propenproduktionen i EU sedan år 2003 och fram till år 2013. I propenfallet går det inte att se någon varken positiv eller negativ trend i produktionsmängd. Den ekonomiska krisen åren 2008-2009 gjorde inte heller något märkbart avtryck. EU-produktionen har legat på mellan 13–14 Mton/år de senaste tio åren och år 2013 låg nivån för första gången precis under 13 Mton (Eurostat, 2014).



Figur 6: Propenproduktionen i EU sedan 2003 [Mton/år]. Källa: (Eurostat, 2014)



Propenproduktionen sker i 16 av EUs medlemsländer och den största produktionen sker även i detta fall i Frankrike och Tyskland. Tillsammans står dem för 44% av all produktion, medan propenproduktionen i Stenungsund står för knappa 2% (Borealis, 2013; Eurostat, 2014).

### **3.3 Eten- och propen användning år 2050**

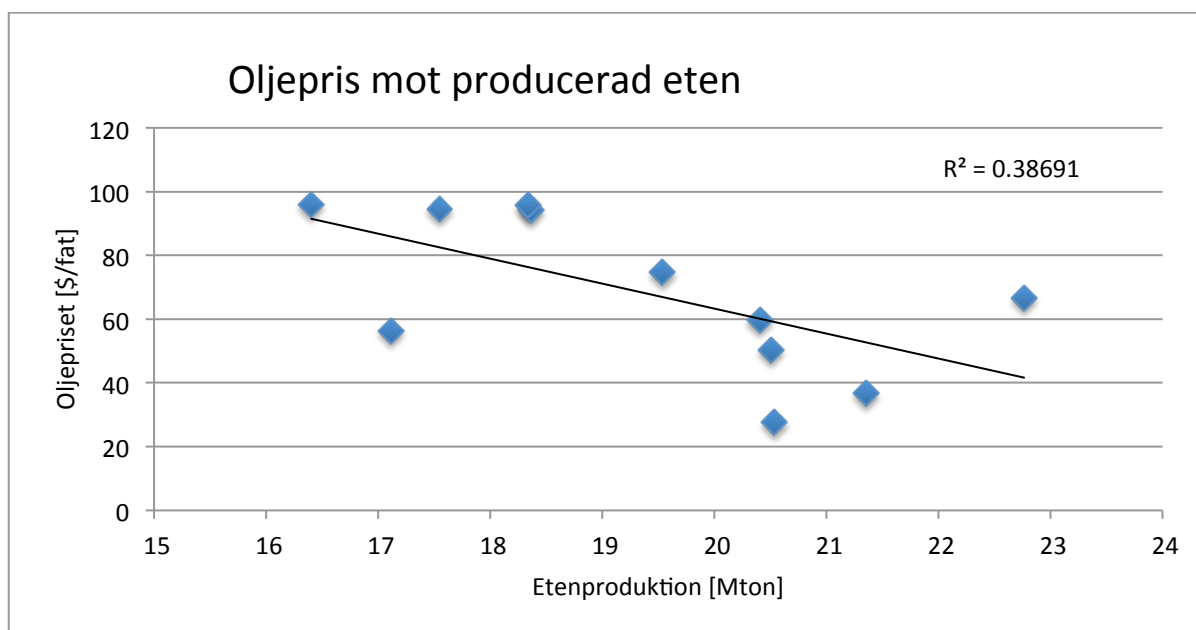
Att göra en prognos för eten- och propenproduktionen år 2050 i EU är svårt och beror på en rad olika parametrar. Därför presenteras olika möjliga framtider i tre scenarier. De olika scenarierna presenterar olika uppskattade framtida eten- och propenbehov. Scenarierna visar tre tänkbara utvecklingar av den europeiska produktionen: en ökning, en minskning eller en oförändrad produktionsutveckling. Scenarierna används senare i rapporten för att räkna ut det uppskattade totala framtida elbehovet för den fossilfria produktionen.

Då nästan all eten och propen som produceras går till plasttillverkning beror den framtida eten- och propenproduktionen på den framtida plastproduktionen. Hur framtiden ser ut för plasttillverkningen beror på vem som uttalar sig, det finns både plastskeptiker och plastfantaster. De mer positiva rösterna anser att plasten kommer användas ännu mer i framtiden, och att allt annat vore orealistiskt. De menar att plast kommer spela en viktig roll i att minska växthusgasutsläppen, öka den globala folkhälsan och minska mängden avfall. Detta genom att användas som material i bland annat lättare bilar och flygplan med näranollutsläpp, artificiell människovävnad och smarta matförpackningar som känner av matens status och mognadsgrad (Andrady & Neal, 2009). Samtidigt arbetar EU för en minskad engångsanvändning av plast genom att införa mål om exempelvis en minskad användning av plastpåsar (TheEuropeanPlasticsIndustry, 2014). Ett annat EU-mål som också indikerar en mindre framtida nyproduktion av plast är mål kring ökad materialåtervinning av plast (EU-kommissionen, 2014b).

#### **3.3.1 Scenario ett – BAU**

Scenario ett är att produktionen av kolväten år 2050 kommer se ut som produktionen ser ut idag. Baserat på den senast sammanställda produktionsstatistiken för EU från år 2013. I scenario ett är således produktionen av eten 16 Mton och produktionen av propen 13 Mton år 2050.

I detta första scenario är alla parametrar konstanta och inga yttre effekter antas påverka produktionstakten. Ett nämnvärt exempel på en parameter som förvånande nog inte tycks påverka produktionen är priset på olja. I Figur 7 visas de senaste 10 årens etenproduktion i EU plottat mot motsvarande års fatpris på oljan. Till viss del ser det ut som att ju dyrare oljan är desto mindre eten produceras och att ju billigare oljan varit desto mer eten har producerats. Dock visar den infogade trendlinjens låga  $R^2$ -värde att det inte är så. År 2007 producerades det mycket eten, 23 Mton, trots att oljepriset låg på relativt höga priset 66 USD/fatet.



Figur 7: De senaste tio årens etenproduktion plottat mot oljepriset. Källa: (EIA, 2014) och (Eurostat, 2014)

### 3.3.2 Scenario två – Minskning

Scenario två består i att produktionen år 2050 kommer vara hälften av produktionen år 2013, detta som en följd av ökad effektivisering i materialanvändning samt eventuella förbud mot plast i engångsartiklar. I scenario två är produktionen av eten 8 Mton och produktionen av propen 6 Mton år 2050.

Idag utgör nästan hälften av plastanvändandet engångsartiklar som livsmedels- och snabbmatsförpackningar, sjukvårdsdetaljer, odlingsfilm, plastpåsar etc. Dessa produkter har en kort livslängd och slängs direkt eller snart efter användandet (Hopewell et al., 2009) (Gregory, 2009). För att komma undan de negativa effekter som finns med plastanvändning måste konsumtionen av plast minska, i synnerhet i redan industrialiserade länderna, menar Naturskyddsföreningen i en rapport. Förslag som ges på hur man minskar plastanvändandet är att just minska produktion av förpackningsmaterial, engångsartiklar och andra produkter av låg kvalitet och kort hållbarhet (Klar, Gunnarsson, Prevodnik, Hedfors, & Dahl, 2014).

Något som också talar för en minskad plastanvändning i framtiden är att EU nyligen beslutade om ändringar i direktiv 94/62/EG om förpackningar och förpackningsavfall som syftar till att minska användandet av plastpåsar. Syftet med förändringen är både att förhindra och minska tillverkningen av onödiga plastpåsar men också att förhindra det avfall som uppstår då påsen är använd. Målet är att minska användandet av plastpåsar med 80% till år 2025. Detta motsvarar en minskning till 90 plastpåsar/ person och år till år 2019 och sedan ytterligare en minskning till 40 plastpåsar/ person och år till år 2025. Idag använder en genomsnittlig EU-medborgare cirka 200 plastpåsar om året, men siffran varierar och i Sverige används det 100 plastpåsar om året. Den nya lagändring är ett sätt att minska det ohållbara användandet av fossil plast som ett engångsmaterial (EuropeanParliament, 2014). Likande ändringar av direktiv om annat överflödigt plastanvändning kan komma att bli mer vanliga i framtiden. Efter att EU-parlamentet kommit överens med ordförandelandet Italien om minskningen av plastpåsar, röstades förslaget ner av EU-kommissionen bara några dagar före jul år 2014. EU-

kommissionen säger dock att bland annat det stora paketet om cirkulär ekonomi, där plastanvändandet är en del, kan komma att ersättas med ett nytt och bättre förslag (EU-kommissionen, 2014a).

Oavsett plastanvändandet är ett annat spår som kan påverka det framtida nytillverkanget av plast hur stor andel av den tillverkade plasten som materialåtervinns. Under sommaren 2014 föreslog EU-kommissionen ändringar i bland annat direktiven 2008/98/EG om avfall, 94/62/EG om förpackningar och förpackningsavfall och 1999/31/EG om deponering av avfall som handlar om att öka andelen material som återvinns i EU. Förslaget till ändring handlar om att påskynda omställningen till en cirkulär ekonomi i EU där bland annat avfall inte ses som skräp utan som resurser. I allmänhet föreslås att återvinningen av hushållsavfall och återvinningsbara material ska öka till 70% respektive 80%. Mer plastspecifikt föreslås ett förbud mot att deponera återvinningsbara material, så som plast, från år 2025 (EU-kommissionen, 2014b). Plastindustrin själva siktar dock fortfarande på EU-kommissionens tidigare beslut om att ingen plast läggs på deponi till år 2020 (PlasticsEurope, 2013).

Gällande nyproduktion av plast har framtidsutsikterna för den europeiska plasttillverkningen förändrats sedan den ekonomiska krisen. PlasticsEurope som är den europeiska branchorganisationen för plasttillverkning förutspådde innan den ekonomiska krisen att plastanvändandet skulle öka i Europa, med vad de då ansåg blygsamma, 5% per år (PlasticsEurope, 2008). I deras senaste rapport talar de istället om en stabilisering och en långsam återhämtning av plastproduktionen de nästkommande åren. Sedan 2002 har den europeiska samlade plastproduktionen legat mellan 55-60 Mton/år, medan den globala produktionen under samma tidsperiod ökat från 200 till 290 Mton/år (PlasticsEurope, 2013). För att inte hamna efter i den globala plasttillverkningen gick plastindustrin i Europa samman och släppte under hösten 2014 ett manifest där de synliggör de många problem de står inför och publicerar önskemål om förbättringar för sina förutsättningar. Som det står att läsa i avsnitt 2.3 innehåller manifestet en rad önskemål till Europas makthavare att underlätta för plastindustrin. Bland annat genom konkurrenskraftiga priser på råvaror och energi, en enad europeisk energimarknad med förhoppningar på lägre elpriser och ett möjliggörande för utveckling av en europeisk produktion av skiffergas (Abbasi & Abbasi, 2011; Eldringe, 2014).

Ett sista belägg för en minskad etenproduktion är att de senaste 10 åren har produktionen av eten minskat, medan propenproduktionen legat förhållandevis konstant, något som kan ses i Figur 4 och Figur 6. Detta förhållande verkar vara frikopplat från befolkningsökning, oljepriser och ekonomiska kriser, vilket tyder på att oavsett dessa faktorer så kan etenproduktionen fortsätta minska även i framtiden.

Med detta som grund består scenario två i att behovet och således även produktionen av eten och propen ska minska fram till år 2050. Om all engångsansvändning av plast försvinner minskar användandet med 50%, i scenario två antas att behov och produktion hänger samman och således minskar även produktionen med 50% till år 2050. Detta innebär att scenario två består i att produktionen av eten kommer vara 8 Mton och produktionen av propen 6 Mton år 2050.

### 3.3.3 Scenario tre – Ökning

Scenario tre argumenterar för en ökad europeisk produktion av både eten och propen till år 2050. Scenario tre består i att produktionen av eten är 25 Mton och att produktionen av propen är 19 Mton år 2050. Enligt det internationella energiorganet, IEA, bedöms den globala produktionen öka av kemikalier i allmänhet men också specifikt produktionen av eten och propen till år 2050, se Tabell 1. Den globala etenproduktionen beräknas öka med mellan 230-310%, från dagens cirka 120 Mton/år till mellan 280-380 Mton/år. Den globala propenproduktionen beräknas också öka ungefär lika mycket med mellan 230-320%, från dagens cirka 80 Mton till mellan 180-240 Mton/år (IEA, 2013). Idag producerar EU sammanlagt cirka 30 Mton av eten och propen, och står således för 15% av världsproduktionen (Eurostat, 2014).

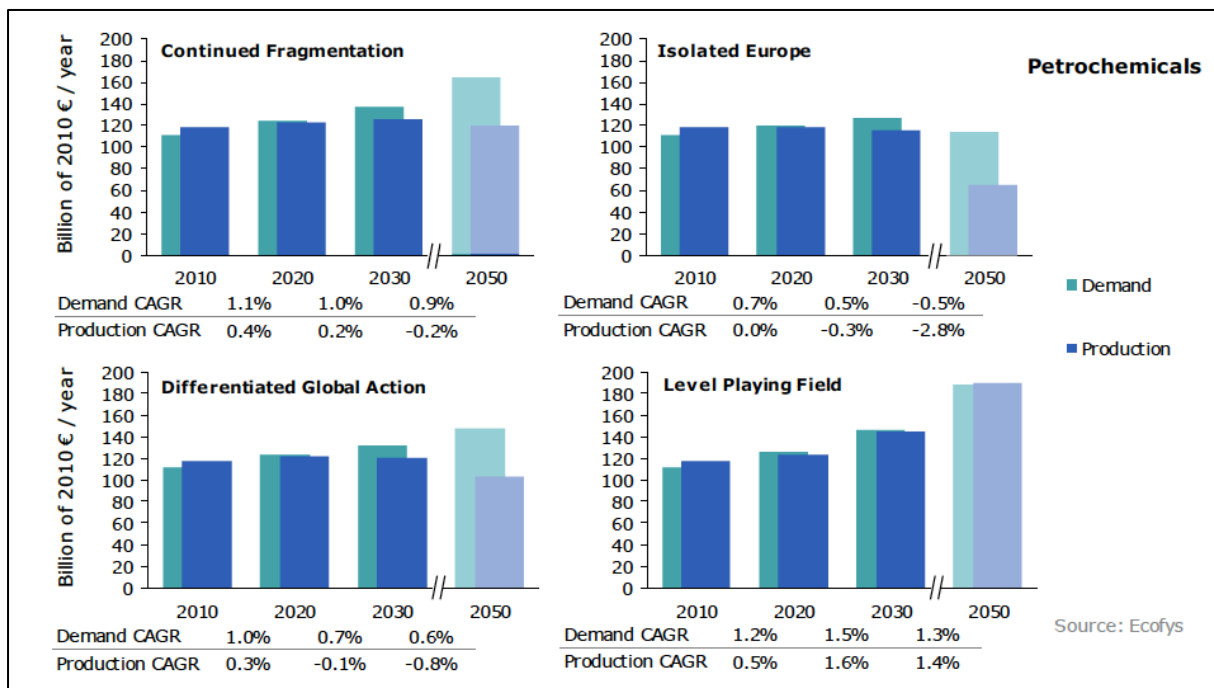
Tabell 1: Eten- och propenproduktionen i världen år 2010 och år 2050, [Mton]. Källa: (IEA, 2013)

	År 2010 [Mton]	Low-Demand Case år 2050 [Mton]	High-Demand Case, år 2050 [Mton]
Eten	123	277-320	290-376
Propen	77	178-208	158-243

Cefic, the European Chemical Industry Council, säger att efterfrågan på kemikalier i allmänhet kommer att öka till år 2050, men att produktionsökningen inte nödvändigtvis sker i EU. Var produktionen sker beror i huvudsak på två saker. En sak är klimatavtalen som enligt Cefic är dyra att anpassa sig till och som hindrar industrin att investera i långsiktiga lösningar. En andra faktor är att det i nuläget är billigare att producera eten i USA än i EU på grund av de låga naturgaspriserna. I EU kostar naturgasen nästan 4 gånger mer än i USA. Det låga råvarupriset påverkar även produktionskostnaden för eten och leder till att produktionskostnaden är mer än dubbelt så hög i EU som i USA. I EU är produktionskostnaden för eten 1200 USD/ton och i USA är den 500 USD/ton (Cefic, 2013a).

I enlighet med Cefic:s uttalande om att produktionsökningen inte nödvändigtvis kommer att ske i EU, beroende på de vad olika klimatavtal kan komma att kosta för industrin och det höga råvarupriset, är det inte givet att ökningen kommer vara lika stor i EU som IEA förutspår att det kommer vara globalt. Cefic förutspår vidare att beroende på vilka klimatavtal som sluts, hur elpriserna utvecklas i världen och EU samt på hur ett pris på koldioxidutsläpp utvecklas kommer efterfrågan och produktion av petrokemikalier i EU se olika ut. Deras resultat presenteras i Figur 8 i ekonomiska termer och inte i Mton, men figurerna visar ändå trenderna (Cefic, 2013b).

Cefic:s fyra scenarierna i Figur 8 skiljer på sig i en rad aspekter, men framförallt gällande effekten av olika klimatavtal. Kommer EU ensamt ta på sig klimatåtaganden som inte resten av världen skriver under på kommer en ekonomiskt tyngd läggas på den inhemska tillverkningsindustrin och således även petrokemin. Alla tre scenarierna visar dock en ökad eller konstant efterfrågan på petrokemikalier fram till år 2050, men i bara det sista fallet "Level Playing Field" tror man att produktion i EU kommer att möta efterfrågan. Den ljusa bakre stapeln visar den förväntade efterfrågan och den mörkare främre stapeln visar den förväntade produktionen.



Figur 8: Efterfrågan och produktion av petrokemikalier i EU för fyra olika scenarier fram till år 2050. Källa: (Cefic, 2013b)

PlasticEurope, den europeiska branschorganisationen för plastindustrin, och amerikanska kemiska rådet tror båda på en ökning av utvecklingen och behovet av plast inom EU. De nämner inte eten eller propen specifikt, men de tror att produktionen av kemikalier i sin helhet kommer att öka med 24% fram till år 2020 (Swift, 2011).

Med detta som grund består scenario tre i att behovet av eten och propen ökar fram till år 2050. Att behovet ökar innebär inte nödvändigtvis att även produktionen ökar i Europa, men den kan göra det. Detta innebär att scenario tre består i att produktionen av eten antas vara 25 Mton och produktionen av propen 19 Mton år 2050.

### 3.3.4 Sammanfattning av scenarierna

De tre ovan beskrivna scenarierna leder till olika förväntad mängd nyproducerad eten och propen år 2050 i EU. För att beräkna den el som behövs för att producera kolvätena på ett fossilfritt sätt från el, vatten och koldioxid, måste man dels veta hur mycket som kommer behövas av slutprodukten och dels veta hur mycket av de två ingående grundämnena som behövs. I Tabell 2 sammanfattas den förväntade massan av eten och propen för de tre presenterade scenarierna. Den sammanlagda massan kolväten ligger inom mellan 15 och 44 Mton.

Tabell 2: Den förväntade mängden eten och propen år 2050 i EU

	Eten [Mton]	Propen [Mton]	Summa [Mton]
Scenario 1 - BAU	16	13	29
Scenario 2 - Minskning	8	6	15
Scenario 3 - Ökning	25	19	44

### 3.4 Beräkning av mängden vätgas och koldioxid

Beräkningarna i följande avsnitt omvandlar de uppskattade framtida behoven av eten och propen till volym och massa för råvarorna vätgas och koldioxid. Beräkningsmodellen presenteras nedan genom scenario ett, där produktionen av eten och propen antas vara 16 Mton eten och 13 Mton propen år 2050. I slutet av förklaringen för beräkningsmodellen presenteras data för alla scenarierna, där beräkningarna utförts enligt samma modell.

Först beräknas behovet av väte och kol i slutprodukterna, men för att täcka råvarubehovet även för de biprodukter som bildas i processen krävs ytterligare vätgas och koldioxid. Vätgas- och koldioxidbehovet för både slutprodukterna och biprodukterna presenteras i Tabell 3.

De konstanter som använts för beräkningarna är följande: (Densiteten är angiven för temperaturen 0°C vid 1 atm tryck.)

Molmassa för kol  $M_C = 12 \text{ g/mol} = 12 * 10^{-9} \text{ kton/mol}$

Molmassa för vätgas  $M_{H_2} = 2 \text{ g/mol} = 2 * 10^{-9} \text{ kton/mol}$

Molmassa för eten  $M_{C_2H_4} = 28 \text{ g/mol} = 28 * 10^{-9} \text{ kton/mol}$

Molmassa för propen  $M_{C_3H_6} = 42 \text{ g/mol} = 42 * 10^{-9} \text{ kton/mol}$

Molmassa för koldioxid  $M_{CO_2} = 44 \text{ g/mol} = 44 * 10^{-9} \text{ kton/mol}$

Densitet vätgas  $\rho_{H_2} = 90 \text{ g/m}^3 = 9 * 10^{-8} \text{ kton/m}^3$

Eten omvandlas från viktenheter till mol. I beräkningsexemplet nedan bildar 16 Mton eten 585 Gmol eten som i sin tur består av 1 170 Gmol vätgas och 1 170 Gmol kol. Vätgas beräknas som vätgas och inte som rent väte, då ämnet hela tiden förekommer i gasform. Att vätet presenteras som vätgas är anledningen till att eten består av lika många mol vätgas som kol, trots att eten innehåller fyra väteatomer och två kolatomer.

Antal mol eten 
$$n_{Eten} = \frac{m}{M} = \frac{16 \text{ Mton}}{28 * 10^{-9} \text{ kton/mol}} = 585 \text{ Gmol}$$

Antal mol vätgas  $n_{H_2} = n_{Eten} * 2 = 1\,170 \text{ Gmol}$

Antal mol kol  $n_C = n_{Eten} * 2 = 1\,170 \text{ Gmol}$

Massan för vätgas beräknas till 2 Mton.

Massa vätgas

$$m_{H_2} = n_{H_2} * M_{H_2} = 2 \text{ Mton}$$

Avslutningsvis beräknas vätgasvolymen till  $26 * 10^9 \text{ m}^3$  och massan koldioxid som behövs för att tillgodose den kol som behövs är  $52 \text{ Mton}$ . Antalet mol koldioxid är detsamma som antalet mol kol.

Volym vätgas

$$V_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{\rho_{H_2}} = 26 * 10^9 \text{ m}^3$$

Massa koldioxid

$$m_{CO_2} = n_{CO_2} * M_{CO_2} = 52 \text{ Mton}$$

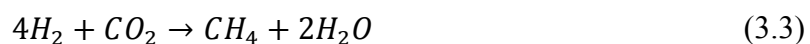
Samma beräkningsmodell används för propen och  $13 \text{ Mton}$  propen resulterar i  $307 \text{ Gmol}$  propen och  $921 \text{ Gmol}$  vätgas och kol. Massan för den vätgas som behövs blir  $2 \text{ Mton}$ . Vätgasvolymen beräknas likadant som i eten-fallet till  $21 * 10^9 \text{ m}^3$  och massan koldioxid som behövs för att tillgodose den kol som behövs i propen är  $41 \text{ Mton}$ .

Beräkningarna utförs för de tre scenarierna och den sammanlagda volymen vätgas och massan koldioxid av det totala eten- och propenbehovet presenteras i de första två kolumnerna i Tabell 3. Notera att värdena är det sammanslagna behovet för både eten och propen.

Tabell 3: Den totala mängden koldioxid respektive vätgas som behövs för att tillfredsställa den framtida eten- och propenproduktionen i de olika scenarierna.

	Behov för slutprodukterna		Verkligt behov	
	$m_{Koldioxid} [Mton]$	$V_{Vätgas} [10^9 m^3]$	$m_{Koldioxid} [Mton]$	$V_{Vätgas} [10^9 m^3]$
Scenario 1 - BAU	92	47	233	237
Scenario 2 - Minskning	46	23	116	118
Scenario 3 - Ökning	138	70	349	355

De två första kolumnerna i Tabell 3 anger vad som krävs för att tillgodose materialet i slutprodukterna. De två sista kolumnerna visar istället det verkliga koldioxid- och vätgasbehovet för eten- och propenproduktionen. Med verkligt behov menas här behovet utifrån de processer och verkningsgrader som valts ut i studien. Exempelvis vid metaniseringen bildar fyra mol vätgas en mol metan och två mol vatten, se formel 3.3. Det vill säga hälften av all vätgas bildar vatten. I eten- och propenproduktionen sker sedan ytterligare bortfall. Mer exakt behövs det produceras 5 gånger mer vätgas än vad som används i den eten och propen som produceras.



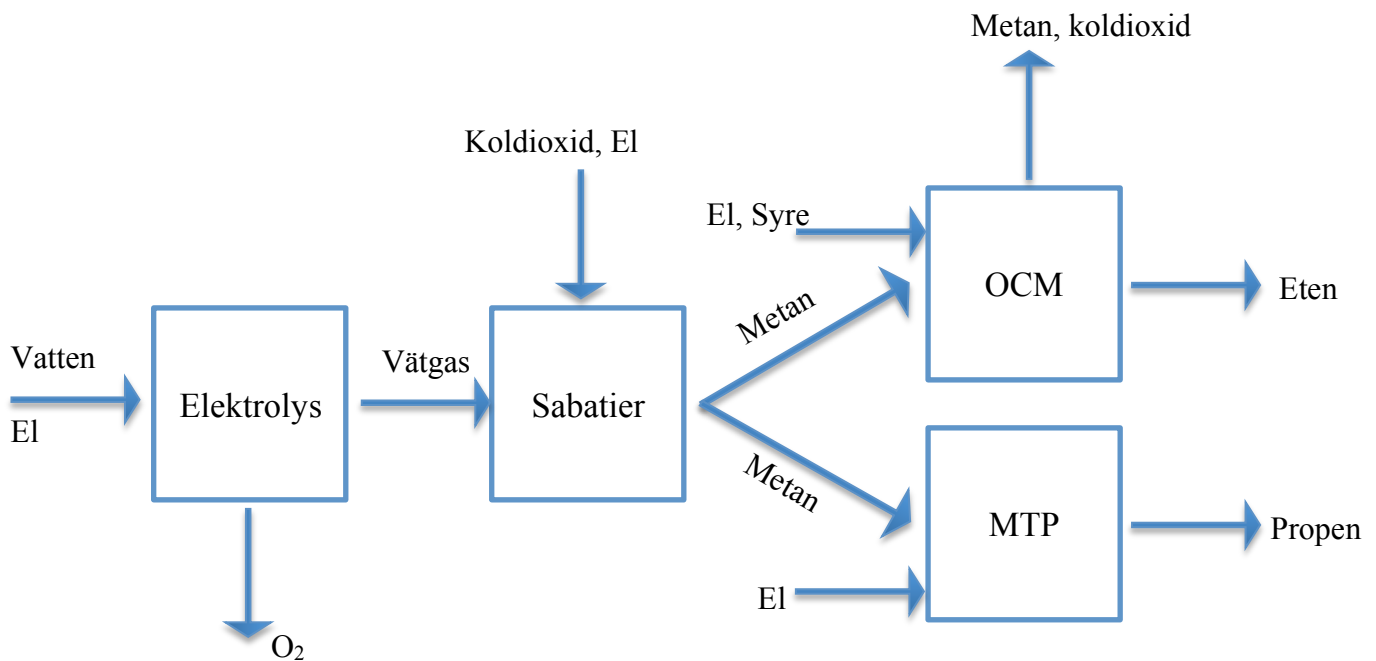
När det gäller koldioxid behövs det tillföras 3 gånger mer koldioxid än vad som presenterats i de första kolumnerna i Tabell 3, detta till stor grund av låg metanomvandling i OCM-processen, se kapitel 6. Det finns många aspekter som skulle kunna ändra detta verkliga

behov, exempelvis recirkulation av den stora mängden oreagerade metan som lämnar OCM-processen.

### 3.5 Processöversikt

Varje processteg och reaktion förklaras var för sig i kommande kapitel, men först presenteras här en översikt av den studerade processen i sin helhet. I **Error! Reference source not found.** ses en schematisk bild över hela processen från el, vatten och koldioxid till eten och propen. Varje processteg som sådant finns i mer eller mindre industriell skala, men den sammansatta processen har aldrig testats. Det råder därför stor osäkerhet kring vad som händer om produktionen skalas upp till den nivå som studerats. Olika synergier och processförbättringar kan minska det totala råvaru- och elbehovet.

Det finns även andra processalternativ än det som studerats, men det som i studien anses vara det bästa alternativet är att först bilda vätgas genom elektrolys av vatten och fossilfri el. Vätgas reagerar sedan i en Sabatierreaktion med koldioxid och bildar metan. Metan går vidare till en Oxidative Coupling of Methane anläggning, OCM, för etenproduktion och en Metanol-till-propen-anläggning, MTP, för propenproduktion. Pilarna i figuren är lika stora, men storleksordningen och enheterna på flödena varierar mycket. Notera också att vissa biproduktsströmmar inte ingår i figuren.



Figur 9: Översiktsbild av den fossilfria eten- och propenproduktionen som helhet

En aspekt som inte tas med i beräkningarna av elbehovet är energin som krävs för att samla in, rena, transportera de råvaror som används; vatten, koldioxid eller syre. I OCM-anläggningen, se kapitel 6, behövs det syrgas och det krävs nära 12 kWh/ Nm<sup>3</sup> syrgas för att producera den (Ren et al., 2008). Syreproduktionen kan därför ses påverka elbehovet i OCM-processen, men detta inkluderas inte i resultatet. Motiveringen är att syftet med studien är att



främst analysera elbehovet för de reaktioner som krävs för att tillverka fossilfria kolväten, inte elbehovet för de råvaror som behövs. Med samma motivering inkluderas inte heller den el som behövs för att fånga in och separera den koldioxid som används i metaniseringen eller den el som krävs för att rena det vatten som används i elektrolysen. Det kan antas att koldioxid kommer att vara en billig råvara även i framtiden då den eventuellt kommer att behöva fångas in från utsläppskällorna av klimatpolitiska skäl. Detta innebär att utsläpparen kommer stå för kostnaden och således även elbehovet för att fånga in och rena koldioxid.

För att motsvara det verkliga kolbehovet för scenario två krävs 118 Mton koldioxid, se Tabell 3, vilket i storleksordning motsvarar två gånger Sveriges totala koldioxidutsläpp under år 2010 (TheWorldBank, 2014). Det kan kännas mycket, men på CO<sub>2</sub>-konferensen<sup>2</sup> presenterade en representant för Nova-Institutet att det årliga användandet av koldioxid som råvara globalt är 145 Mton. Detta motsvarar behovet av koldioxid för scenario två. Koldioxid används idag i huvudsak för ureaproduktion till konstgödsel, det vill säga inte för tillverkningen av kolväten eller polymera material (Carus, 2014).

---

<sup>2</sup> 3<sup>rd</sup> Conference on Carbon Dioxide as Feedstock for Chemistry and Polymers, Essen, Tyskland, 2-3 december 2014

## 4. Elektrolys

Det första steget i att producera fossilfria kolväten från el, vatten och koldioxid är elektrolys. Elektrolys tillverkar vätgas och syre från vatten med hjälp av elektricitet. Här presenteras de ingående delarna och resulterar i en uppskattning av hur mycket el [TWh] som kommer att behövas för de tre scenarierna.

### 4.1 Val av metod

Förutom elektrolys som fossilfri tillverkningsmetod av vätgas, kan det ske genom pyrolys från biomassa eller water-gas shift reaktion. Då avgränsningen är att utgå från el, vatten och koldioxid är det bara elektrolys som är lämplig i denna analys. Water-gas shift reaktionen omvandlar också vätet i vatten till vätgas, men genom att reagera med kolmonoxid och bilda koldioxid. Pyrolys bildar en gasblandning där vätgas ingår genom att ett bränsle upphettas och sönderfaller utan att förbrännas. I denna process som också kallas torrdestillation bildas inte bara vätgas utan en blandning av olika gaser beroende på vilket ämne som behandlas.

Det finns tre elektrolysmetoder och de skiljer sig en del åt. I texten presenteras alla tre tillsammans med deras respektive teknikutveckling och elbehov. Genomgående i rapporten gäller att för att slutprodukterna eten och propen ska bli fossilfria måste alla ingående energikällor och råvaror också vara det. Således är det en förutsättning att elen är fossilfri och att vattnet renats utan användning av fossila råvaror.

### 4.2 Elektrolysens grunder

Elektrolys är ingen ny eller obeprövad metod, utan användes kommersiellt redan under 1890-talet. Elektrolys betyder dela med hjälp av elektricitet på grekiska och kan användas på en rad olika substanser. Här beskrivs elektrolys av vatten som allmänt kallas bara elektrolys (Norbeck et al., 1996).

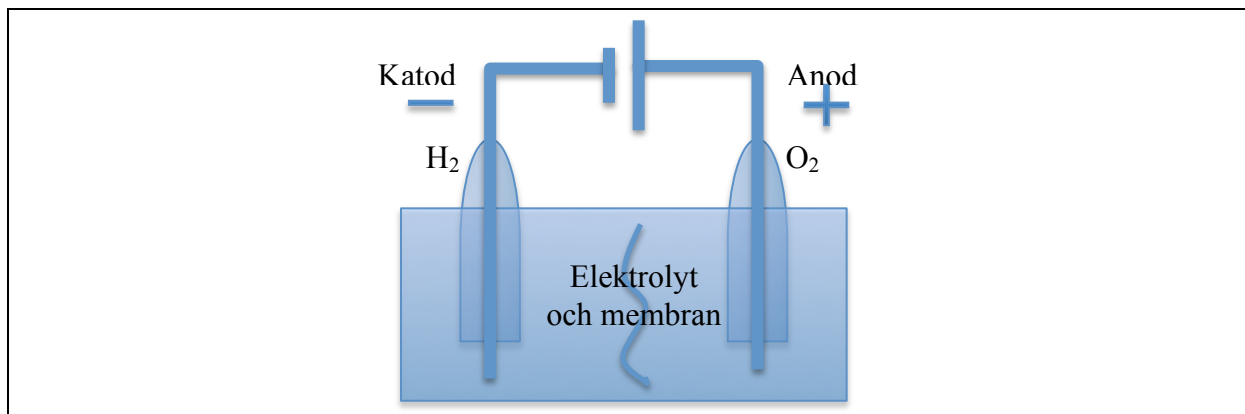
Den vätgas som produceras idag kommer från fossila råvaror som olja, naturgas eller kol, men elektrolys används också som tillverkningsmetod, dock i begränsad utsträckning. Av 2011-års globala vätgasproduktion på 53 Mton produceras cirka 7% via elektrolys (SBCEnergyInstitute, 2014). Anledningen till att elektrolys inte är vanligare som tillverkningsmetod är att kostnaderna och energianvändningen är höga jämfört med de fossila tillvägagångssätten (Abbasi & Abbasi, 2011).

Elektrolys består i att en ström och en spänning sätts över vatten som då spjälkas till dess beståndsdelar, vätgas och syrgas. Det finns i dagsläget tre typer av elektrolys: alkalisk elektrolys, protonväxlingsmembrans elektrolys (PEM) och fastoxidelektrolys (SOEC). Oavsett vilken teknik som används är det ungefär samma kemi som ligger till grund för teknikerna. Den sammansatta reaktionen 4.1 nedan visar att två mol vatten spjälkas till två mol vätgas och en mol syrgas.



Den ovan presenterade reaktionen sker i två steg, en oxidation och en reduktion. Beroende på vilken teknik som används sker olika reaktioner, men slutresultatet är detsamma. De olika oxidations- och reduktionsreaktionerna presenteras i samband med de olika teknikerna i avsnitt 4.3.

Grunderna för elektrolys är att en strömkälla och en spänning kopplas via två elektroder, en katod och en anod, till en ledande vätska, en elektrolyt. Elektronerna vandrar på så sätt via elektrolyten. **Error! Reference source not found.** illustrerar en schematisk bild över en laborieuppställning av den enklaste typen av elektrolys, alkalisk elektrolys. I detta fall leds elektronerna från den negativt laddade katoden till den positivt laddade anoden, alltså från minus till plus via vätskan, elektrolyten.



Figur 10: Schematisk bild över elektrolys på laborieskala

Rent vatten har dålig konduktiv förmåga, det vill säga är ett dåligt ledande ämne, därför tillsätts ett ämne med högre konduktivitet i elektrolyten. Vilket ämne det är beror på vilken teknik som används. När strömmen leds genom elektrolyten joniseras vatten och spjälkas till vätgas och syre vid de olika elektroderna. Insamlingsrören över elektroderna i **Error! Reference source not found.** samlar in de producerade gaserna, men vid startläget som bilden illustrerar är de fyllda med elektrolyten, den ledande vätskan. Då gaserna bildas fylls rören och vattnet pressas ner, och det uppnås väldigt rena slutprodukter. När elektrolys sker i större skala är provrören ersatta av mer storskaliga insamlingsmekanismer, men teorin är den samma.

Om vätgas och syrgas kommer i kontakt med varandra uppstår en explosiv blandning. För att undvika denna risk placeras ett membran mellan elektroderna som förhindrar att gaserna kommer i kontakt med varandra, vilket även bidrar till att slutprodukterna har hög renhet.

En av fördelarna med elektrolys är att den svårlagrade elektriska energin omvandlas till kemisk energi som är betydligt enklare att lagra, tekniken kallas power-to-gas. Som en följd av en ökat användning av intermittenta energikällor som sol-, vind- och vågkraft produceras det ibland mer el än vad som konsumeras. Detta leder till mycket låga och ibland negativa elpriser. Att producera vätgas eller som studie undersöker fossilfria kolväten av överskottselen ses som en möjlig lösning på problemet.

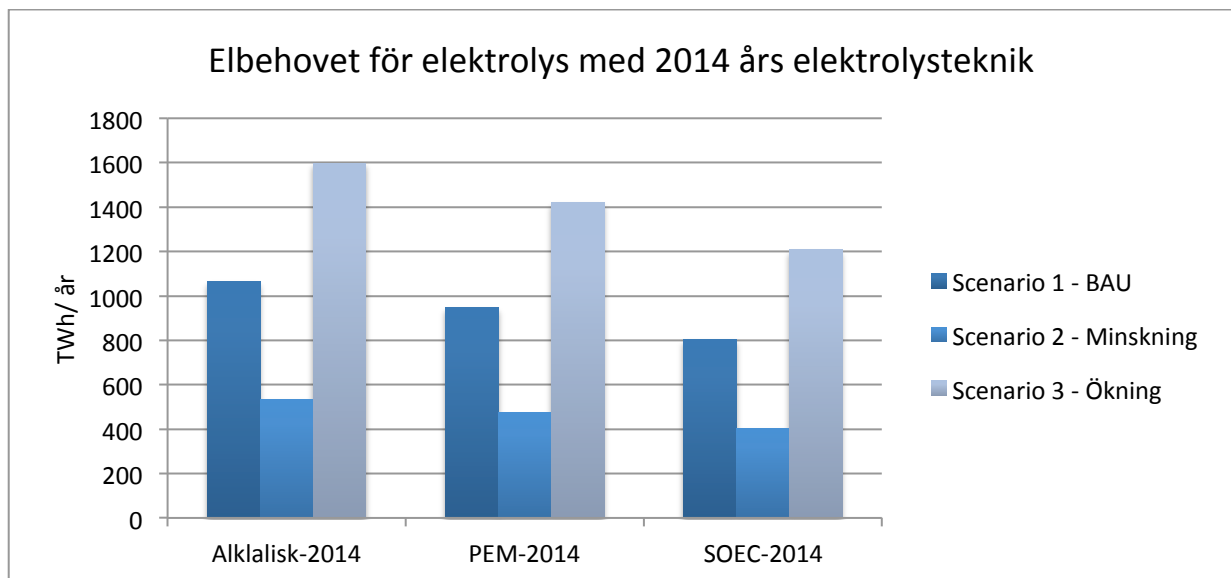
En annan fördel med elektrolys är att processen inte bidrar med några växthusgaser, och därför inte heller påverkar växthuseffekten negativt. Inte heller några oanvändbara

biprodukter skapas, det producerade och rena syret kan användas i andra industriella tillämpningar. En nackdel med elektrolys är att effektiviteten inte är särskilt hög ännu, vilket leder till högt elbehov. Verkningsgraden ligger på mellan 50-70% (Bičáková & Straka, 2012). Elektrolys kan ske redan i rumstemperatur, men effektiviteten ökar med ökad temperatur. Därför pågår nu forskning och utveckling kring nya typer av elektrolyser som arbetar vid högre temperaturer. Förhoppningen är att tillverka elektrolysceller som uppnår den teoretiska verkningsgraden till 90% (Sohal, Virkar, Rashkeev, & Glazoff, 2010).

### 4.3 Dagens elbehov för elektrolys

Elbehovet för att bilda vätgas till de framtida ickefossila kolvätena med hjälp av elektrolys beror på vilken teknik som används. I den sammanfattande Figur 11 presenteras det totala elbehovet som skulle krävas för att tillgodose EU:s eten- och propenproduktion år 2050 med 2014-års verkningsgrader och elbehov för respektive elektrolysmetod. För scenario ett varierar det mellan 810-1070 TWh, för scenario två varierar det mellan 400-530 TWh och för scenario tre varierar det mellan 1200-1600 TWh.

Elbehovet för de tre scenarierna kan jämföras med EU:s totala elproduktion som är cirka 3300 TWh (EU-kommissionen, 2013). Detta innebär att de olika scenarierna motsvarar cirka 30%, 15% respektive 45% av EU:s årliga elproduktion idag.



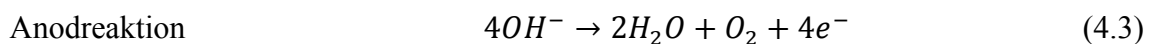
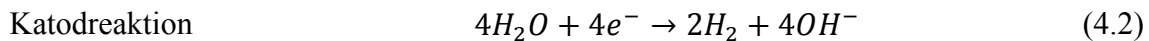
Figur 11: Sammanställning av elbehovet för att tillfredsställa den fossilfria väteproduktionen år 2050 med 2014-års teknik som visar att elbehovet varierar mellan 400-1600 TWh beroende på scenario och teknik.

#### 4.3.1 Alkalisk elektrolys

Den äldsta, billigaste och mest använda elektrolysmetoden är alkalisk elektrolys (Bičáková & Straka, 2012). Som namnet antyder har den en basisk elektrolyt som typiskt består av kaliumhydroxid, KOH (Turner et al., 2008). I en alkalisk elektrolyscell sker först reduktionen

av vatten vid katoden och sedan transporteras hydroxidjonen via membranet till anoden där den oxideras och elektronerna återförs till strömkretsen.

I formlerna (4.2-4.3) nedan presenteras reduktionen och oxidationen. Reduktionen sker vid den negativa katoden där vatten joniseras och bildar vätgas och hydroxidjoner. Då hydroxidjonerna transporterats genom det gasavskiljande membranet sker oxidationen vid den positiva anoden där hydroxidjonen oxideras till syrgas och vatten varpå elektronerna återförs till systemet.



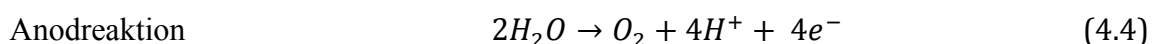
Katoderna består ofta av nickel med en katalytisk beläggning för att öka effektiviteten och anoderna består av nickel eller koppar med en metalloxid beläggning (Holladay, Hu, King, & Wang, 2009). Båda elektroderna har en porös yta för att uppnå en så stor kontaktyta som möjligt. Den stora kontaktytan bidrar till att reaktionerna går snabbt och att de bildade gaserna bubblar iväg effektivt samt lämnar plats för nya reaktioner.

En av nackdelarna med alkalisk elektrolys är att basen i elektrolyten medför att lösningen blir frätande, något som orsakar dyrare materialval och mer slitage. Trots detta är livslängden för en alkalisk elektrolyscell upp till 15 år (Ivy, 2004). Mångåriga storskaliga försök och förbättringar har ökat effektiviteten, men den är fortfarande relativt låg, mellan 50-60% (Bičáková & Straka, 2012).

Enligt en sammanställning som gjorts ligger elbehovet för alkalisk elektrolys historiskt på mellan 4,3-7,5 kWh/Nm<sup>3</sup> vätgas (Ursua, Gandia, & Sanchis, 2012). Dagens alkaliska elektrolyser har ett lägre elbehov på mellan 3,9-4,65 kWh/Nm<sup>3</sup> vätgas (Elektrolyse, 2014; IndustrieHauteTechnologie, 2014). På CO<sub>2</sub>-konferensen i Essen talade det belgiska power-to-gas företaget Hydrogenics talesperson Denis Thomas om ett högre elbehov och sa att deras alkaliska elektrolys i dags läget förbrukar 4,44-5,4 kWh/Nm<sup>3</sup> vätgas (Thomas, 2014).

### 4.3.2 Protonväxlingsmembrans elektrolys (PEM)

Protonväxlingsmembrans elektrolys, PEM (Proton Exchange Membrane), har en elektrolyt som består av polymerer istället för en bas som alkalisk elektrolys. Detta medför att konduktivitetsförmågan och verkningsgraden har potential att bli högre (Benjaminsson, Benjaminsson, & Rudberg, 2013). Kemin bakom är något annorlunda och presenteras i formlerna (4.4-4.5) nedan. I en PEM-elektrolys börjar reaktionen i anoden istället för i katoden. Vatten oxideras och spjälkas vid den positivt laddade anoden till syre och protoner. Syret bubblar upp och vätejonerna transporteras genom membranet till katoden. Vid den negativt laddade katoden reduceras vätejonerna till vätgas.



Katodreaktion



PEM-tekniken finns på marknaden men är relativt ny. Bara ett fåtal företag säljer PEM-elektrolysceller. De främsta anledningarna till att tekniken ännu inte är lämplig för industriellt storskaligt bruk är att cellerna har en kort livstid på cirka 5-10 år (Benjaminsson et al., 2013) och att PEM har höga investeringskostnader (Rajeshwar, McConnell, & Licht, 2008). Fördelarna är att effektiviteten är något högre än för alkalisk elektrolys och ligger på runt 50-65% (Bičáková & Straka, 2012), risken för bildandet av den explosiva gaskombinationen syre och vätgas är mindre, renheten på vätgas är högre och jontransporten mellan elektroderna sker snabbare (Rajeshwar et al., 2008).

Av de PEM-elektrolyser som finns på marknaden har energikonsumtionen historiskt sätt legat på en liknande nivå som för alkalisk elektrolys, runt 4,5-6,0 kWh/Nm<sup>3</sup> (Barbir, 2005). I dagens litteratur talar man om ett elbehov på 4,3-4,5 kWh/Nm<sup>3</sup> (Kokoh et al., 2014). För att visa hur snabbt förbättringarna har skett kan man se att år 2005 hade en PEM-elektrolys en elkonsumtion på 6,6 kWh/Nm<sup>3</sup> och en produktion på upp till 1 Nm<sup>3</sup>/h (Barbir, 2005). Fem år senare visar ett annat företag en PEM-elektrolys med en elkonsumtion på mellan 4-5 kWh/Nm<sup>3</sup>, som dessutom producerar betydligt mer vätgas, 5 Nm<sup>3</sup>/h (Millet et al., 2010). På den internationella CO<sub>2</sub>-konferensen om att använda koldioxid som råvara talade Guido Saracco, en italiensk forskare som är ansvarig för det internationella samarbetet Eco<sup>2</sup>CO<sub>2</sub>, om att dagens PEM-elektrolys använder 3,9-4,1 kWh/ Nm<sup>3</sup> vätgas (Saracco, 2014).

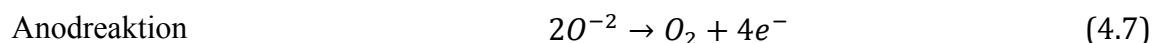
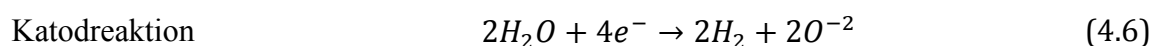
### 4.3.3 Fastoxidelektrolys (SOEC)

Det tredje och nyaste sättet att spjälka vatten via elektrolys kallas fastoxidelektrolys, SOEC, Solid Oxide Electrolysis Cells. Det är en vidareutveckling på den alkaliska elektrolysen som tar tillvara de effektivitetsfördelar som sker vid högre arbetstemperatur. SOEC arbetar under temperaturer mellan 600-900°C (Zahid, Schefold, & Brisse, 2010). Processen använder inte bara el som energikälla utan även en värmekälla med hög temperatur. SOEC är därför beroende av en högvärdig värmekälla som kan värma elektrolyscellerna. För att vätet ska bli fossilfritt ska även värmekällan vara det, den kan komma från exempelvis ickefossila processer som massaindustrin eller geotermiska processer. Specifikt för tillverkningen av fossilfri eten och propen kan värmen komma från överskottsvärmen i metaniseringsprocessen. Sabatierreaktionen är exoterm, vilket innebär att den avger värme, som kan utnyttjas i fastoxidcellselektrolysen, se avsnitt 5.2.

Den andra stora skillnaden från de övriga elektrolysmetoderna är att elektrolyten i SOEC är fast. Elektrolyten består av ett keramiskt material som har hög konduktivitet och bra motstånd mot den höga temperaturen. Den höga temperaturen och den effektivare elektrolyten gör att SOEC har en högre teoretisk verkningsgrad, vilket bidrar till det stora intresset för att utveckla denna teknik. Om man bortser från energin som måste tillföras via värme, utan bara ser till elbehovet och effektiviteten från el till vätgas, kan den teoretiskt uppgå till 90% (Sohal et al., 2010). Ytterligare en aspekt som skiljer SOEC från de övriga elektrolysmetoderna är att processen kan köras omvänt och således producera el med hjälp av vätgas och syre. Det vill säga, elektrolyscellen kan fungera som en bränslecell. Denna aspekt har mindre betydelse för kolväteproduktion, men som är gynnsam i andra tillämpningar som power-to-gas.

En nackdel med SOEC är att renheten på den vätgas och syrgas som produceras inte är lika hög som för de andra elektrolysprocesserna. Då processen körs under höga temperaturer, är vatten i gasfas vilket resulterar i att de producerade gaserna innehåller vattenånga som måste kondenseras bort innan de kan användas vidare. Denna extraprocess använder energi och medför högre investeringskostnader jämfört med de andra elektrolysmetoderna (Ursua et al., 2012). Ytterligare en nackdel är känsligheten på elektrolyten, den degraderas snabbt och har därför en kort livslängd. Ny forskning som presenterades på den internationella CO<sub>2</sub>-konferensen visade att om elektrolysen stängs av eller körs omvänt ett kort tag, återhämtar sig elektrolyten. Dock sker aldrig återhämtningen till ursprungsläget och så fort processen sätts igång igen påbörjas en ny degraderingsprocess. SOEC har visat sig vara en stabil och stresstålig process, men för att kunna gå vidare och implementera den på industriell skala måste det arbetas vidare med hur degraderingen av den fasta elektrolyten kan begränsas ytterligare (Mogensen, 2014).

Kemin och reaktionsordningen är nästan densamma som för alkalisk elektrolys, med skillnaden att det är syrejoner som transporteras genom elektrolyten och inte hydroxidjoner. Reaktionerna presenteras i formlerna (4.6-4.7) nedan. Det första som sker är en reduktion av vatten vid den negativt laddade katoden som bildar vätgas och syrejoner. Syrejonen transporteras via den keramiska elektrolyten till den positivt laddade anoden där den oxideras till syrgas.



SOEC-tekniken finns ännu inte tillgänglig för storskalig produktion, utan befinner sig i forsknings- och utvecklingsstadiet. År 2008 sa man att det kommer ta minst 10 år innan SOEC är tillgängliga på marknaden (Hočevar & Summers, 2008) och år 2013 räknade ett tillverkningsföretag med att ha SOEC-tekniken tillgänglig på marknaden inom 4-5 år (Benjaminsson et al., 2013). Utvecklingen verkar gå enligt planerna och tekniken kommer troligen finnas tillgängligt för storskalig industriell tillämpning innan år 2020. Ytterligare bevis på SOEC-teknikens framfart är att det tyska företaget Sunfire på CO<sub>2</sub>-konferensen presenterade att de i mitten av november år 2014 öppnat världens första power-to-liquid anläggning som bland annat använder sig av en SOEC. Anläggningen producerar syntetiska bränslen, och processen startar med att vätgas produceras i en SOEC-elektrolys. Det är en demonstrationsanläggning och i ett pressmeddelande meddelar de att de hoppas kunna gå i industriell skala under år 2016 (Sunfire, 2014b). I de pilotanläggningar som finns på universitet och företag presenteras en elkonsumtion för SOEC-elektrolys på i genomsnitt cirka 3,4 kWh/Nm<sup>3</sup> vätgas (Mogensen, 2014).

#### **4.4 Elbehov för elektrolys år 2050**

Den alkaliska elektrolysen är en gammal och mycket beprövad metod, många förbättringar har redan genomförts, men utvecklingen pågår fortfarande. Exempel på utveckling som är på gång är ökning av arbetstemperatur och utveckling av nya membranmaterial. Den normala temperaturen idag är mellan 65-100°C (Gilliam, Graydon, Kirk, & Thorpe, 2007), men då

ökad temperatur leder till att styrkan i vattenmolekylens bindningar minskar, elektrolytens konduktivitet ökar och elektrodreaktionerna går snabbare utvecklas nu alkaliska elektrolysceller som kan arbeta i upp till 150°C (Ursua et al., 2012). Membranet som hindrar att gaserna blandas och bildar en explosiv blandning minskar effektiviteten genom att minska konduktiviteten och på så sätt fördröja förflyttningen av joner och bildandet av vätgas. Nya material är under utveckling för att minimera denna fördröjning.

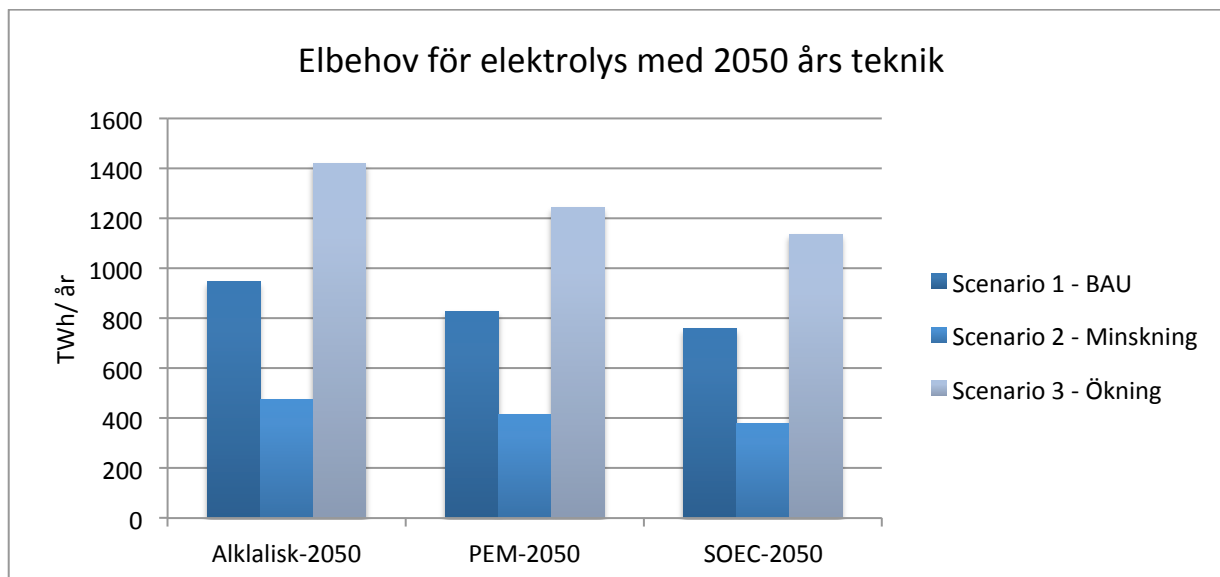
Baserat på att tekniken för alkalisks elektrolys är gammal och att mycket utveckling redan skett antas att potentialen är begränsad för att den alkaliska elektrolysen ska väsentligt förbättras. Det är snarare troligt att de två andra elektrolysmetoderna kommer effektiviseras ytterligare och lyckas uppnå en lägre elbehov än den alkaliska elektrolysen. Elbehovet för alkalisk elektrolys varierar mycket och ligger idag på mellan 4-5 kWh/Nm<sup>3</sup> vätgas. Då inga data om framtida förväntade effektivisering av elbehovet är funna, antas det framtida elbehovet för vätgasproduktion att vara snarlik dagens elbehov på 4 kWh/Nm<sup>3</sup>.

PEM-elektrolys utvecklingspotential är fortfarande stor, och består bland annat i materialutveckling. Det gasavskiljande membranet och elektrolyterna utgör idag en stor del av investeringskostnaden. Lyckas man utveckla dessa blir det billigare att investera i PEM, vilket i sin tur leder till ytterligare utveckling. Dagens rapporterade elbehov för PEM-elektrolys på cirka 4 kWh/Nm<sup>3</sup> förväntas minska när produktionstakten ökar. På bara 5 år har elbehovet minskat med nästan hälften, se avsnitt 4.3.2. Inte heller gällande PEM har det funnits uppskattningar på förväntat framtida elbehov eller effektivisering, men med den utveckling som skett på denna korta tid görs uppskattningen att elkonsumtionen kommer fortsätta minska något till år 2050. Elkonsumtionen för PEM-elektrolys år 2050 antas därför vara 3,5 kWh/Nm<sup>3</sup> vätgas.

SOEC-tekniken har potential att utvecklas till industriell skala, men då den inte är kommersiellt tillgängligt ännu är det osäkert när den kommer att finnas på marknaden. Flera talar om att tekniken kommer att finnas inom en 2-5 års period, därför antas här att SOEC finns i industriell skala år 2050. De största hindren i nuläget är den begränsade stabiliteten i elektrolyscellen som beror på att den fasta elektrolyten åldras snabbt och att elektroderna avaktiveras, det vill säga inte längre leder el (Ursua et al., 2012). Lyckas dessa problem åtgärdas kommer en framtida storskalig användning av SOEC inte vara långt borta. Vätgas har ett värmevärde på 3 kWh/Nm<sup>3</sup> (Pollet, (n/a)), då detta är teoretiskt minimum är det inte möjligt att producera vätgas med lägre elbehov än så. Dagens småskaliga SOEC-anläggningar har en elkonsumtion på 3,4 kWh/Nm<sup>3</sup> vätgas och lyckas man komma nära den teoretiskt högsta effektiviteten el till vätgas och ha anläggningen i anslutning till en högvärdig värmekälla antas ett elbehov på 3,2 kWh/Nm<sup>3</sup> vätgas.

I Figur 12 presenteras det totala elbehovet för att tillgodose 2050-års eten- och propenproduktion med 2050-års teknik. För scenario ett varierar det mellan 760-950 TWh, för scenario två varierar det mellan 380-470 TWh och för scenario tre varierar det mellan 1140-1420 TWh.





Figur 12: Elbehov för vätgasproduktion för eten- och propentillverkningen i EU med 2050-års teknik. (Alkalisk 4 kWh/Nm<sup>3</sup>, PEM 3,5 kWh/Nm<sup>3</sup>, SOEC 3,2 kWh/Nm<sup>3</sup>)

Om man jämför Figur 11 och Figur 12 visas den förväntade minskningen av elbehov till följd av processeffektiviseringarna. I scenario ett kommer det förväntade elbehovet att minska från dagens cirka 1070 TWh till cirka 950 TWh för alkalisk elektrolys. För PEM kommer det förväntade elbehovet att minska från cirka 950 TWh till cirka 830 TWh. För den nyaste och mest lovande tekniken kommer elbehovet att vara minst. Dagens laboratorieanläggningar ligger på cirka 810 TWh, men om man innan år 2050 lyckas utveckla SOEC till nära den teoretiskt möjliga verkningsgraden och placerar anläggningarna nära en högvärdig värmekälla kommer det förväntade elbehovet att vara 760 TWh för att producera all den vätgas som behövs i en fossilfri kolväteproduktion.

Elbehoven kan jämföras med EU:s totala elproduktion som är cirka 3300 TWh idag (EU-kommissionen, 2013). Detta innebär att den effektivaste SOEC-tekniken år 2050 har ett elbehov som motsvarar cirka 20%, 10% eller 35% av dagens elproduktion i EU.

#### 4.5 Alternativ vätgasproduktion

Den överlägset största andelen av den globala vätgasproduktionen sker via fossila råvaror, de 7% som tillverkas ickefossilt produceras via elektrolys (SBCEnergyInstitute, 2014). Ett alternativt tillvägagångssätt för vätgas är fotolys. Istället för att solens energi omvandlas till el, som sedan används i en konventionell elektrolyscell består fotolys av att solenergin direkt spjälkar vatten. Verkningsgraden är omkring 16%, vilket år 2006 var högre än om solenergin omvandlades till el via solceller som sedan användes i en konventionell elektrolys (Nikoleris, 2011). Då verkningsgraden på solceller ökat sedan dess kan detta förhållande ha ändrats, men huvudanledningen till att fotolys inte väljs är en annan. Att producera vätgas är ett sätt att lagra energi när elnätet är överbelastat. Vätgasproduktionen och därför även eten- och propenproduktionen kräver mycket el, varpå denna tillverkningsmetod inte förväntas bli en helhetslösning, men en metod som kan användas då det finns elöverskott från intermittenta energikällor om vind-, sol-, våg- och tidvattenkraft.

## 5. Metanisering

Innan eten eller propen kan skapas måste vätgas från elektrolysen reagera med en kolkälla för att bilda ett kolväte. Här behandlas denna process och vilken mängd el [TWh] det resulterar i för att producera den metan som behövs för att tillgodose EU:s eten- och propenbehov år 2050. Kolkällan som används är koldioxid och processen består i en Sabatierreaktion.

### 5.1 Val av metod

För att bilda eten och propen från vätgas och koldioxid väljs i denna studie att gå via metan. Att bilda metan från vätgas och koldioxid kan ske såväl katalytiskt som biologiskt. Här behandlas katalytisk metanisering med hjälp av Sabatierreaktionen. Det finns andra alternativ till Sabatierreaktionen, men för att hitta en specifik kolvätefraktion är Sabatierreaktionen effektivast då den är mer selektiv än andra alternativ. Ett annat alternativ skulle vara att använda sig av Fischer-Tropsch som resulterar i en blandning av kolväten, men då det inte är ett bränsle eller annan blandad produkt som söks, väljs Sabatierreaktionen. Fischer-Tropsch använder inte heller koldioxid som råvara, utan syntesgas bestående av kolmonoxid och vätgas. Att Sabatierreaktionen använder koldioxid som råvara är ytterligare ett argument för att den väljs som metod.

Utöver vätgas används koldioxid som råvara i Sabatierreaktionen. Var koldioxiden kommer ifrån eller hur den fångas in behandlas inte i denna studie, men för att kolvätena ska vara icke-fossila ska det ske med fossilfri energi samt komma från fossilfria källor som pappers- och massabruk samt biogas- och etanolproduktion.

### 5.2 Metaniseringens grunder

Sabatierreaktionen är en katalytisk metanisering och som namnet antyder drivs processen av en katalysator, ett material som påskyndar den kemiska reaktionen utan att själv förbrukas. Den reaktion som sker sammanfattas i reaktionen 5.1 nedanför. Reaktionen visar att fyra mol vätgas tillsammans med en mol koldioxid resulterar i en mol metan samt två mol vatten.



Detta gör att det måste produceras minst 2 gånger mer väte än vad som faktiskt används i slutprodukten. Som man kan se i reaktion 5.1 bildas det två mol vatten för varje mol metan. Detta är en del av bakgrunden till att väteproduktionen är nästan fem gånger större än det vätebehovet för slutprodukterna, se avsnitt 3.4.

Sabatierreaktionen är exoterm, det vill säga det produceras värme när reaktionen sker. Värmen som bildas i Sabatierreaktionen antas i beräkningarna användas som värmekälla för fastoxids-cellelektrolysen och är den enda processintegration som ingår i studiens beräkningar. Sabatierreaktionen är dock inte spontan utan kräver aktiveringsenergi, att minska mängden energi som krävs är katalysatorns uppgift för att på så sätt minska det totala energibehovet för reaktionen, processen och slutprodukterna.

Av en väl fungerande katalysator krävs fyra egenskaper. Först och främst ska den kunna bilda intermediärer med reaktanterna, det vill säga vätgas och koldioxid. Precis som katoderna i elektrolysen bör katalysatorns yta vara porös för att bidra med fler aktiva platser och således sänka aktiveringsenergin (Benjaminsson et al., 2013). Katalysatorn ska ha valenselektroner i d-skalen då detta skapar kemiska egenskaper som är gynnsamma för katalysatorn. När katalysatorerna, som oftast är metaller, donerar eller accepterar elektroner till sitt yttersta elektronskal verkar de som katalysatorer (Kopyscinski, Schildhauer, & Biollaz, 2010). Till sist är det viktigt att katalysatorn kan anta olika oxidationstal. Oxidationstalet bestäms av antalet elektroner ämnet har beroende på sitt oladdade tillstånd. Dock har en kemisk förening alltid oxidationstalet noll, vilket innebär att summan av de ingående ämnenas laddning är noll. Däremot kan de ingående ämnenas laddning variera sinsemellan. Järn har till exempel två valenselektroner i d-skalen och kan anta oxidationstalen +2, +3, +4 och +6 (Benjaminsson et al., 2013).

Eftersom koldioxid är en stabil kemisk förening som inte lätt reagerar med andra ämnen ligger mycket av nyckeln till en lyckad användning av koldioxid som råvara i att finna en effektiv katalysator. På CO<sub>2</sub>-konferensen talade många både forskare och företag om utvecklingen av katalysatorer. Det amerikanska företaget Novomer, som varit i kontakt med IKEA om deras mål att enbart ha förnyelsebar plast i sina produkter till år 2020, tillverkar idag några lastbilsflak i veckan med plaster delvis tillverkade med koldioxid och egenframtagna, väl patenterade katalysatorer (Waddington, 2014). Ett annat exempel på hur viktiga och eftertraktade katalysatorerna är i detta sammanhang är Econic Technologies som är ett brittiskt spinoff-företag från Imperial College London som också deltog vid CO<sub>2</sub>-konferensen. De har ingen egen produktion av plast, utan säljer katalysatorer de själva utvecklat till andra som då kan tillverka kolväten med koldioxid som råvara (Henderson, 2014). Se appendix för utförligare beskrivning av olika aktörers sätt att använda koldioxid som råvara.

Utöver användningen av katalysatorer är även temperaturen viktig för effektiviseringen av reaktionen. Då Sabatierreaktionen är exoterm har den ett negativt  $\Delta G$ -värde, vilket innebär att reaktionen är termodynamiskt gynnsam. Hur gynnsam reaktionen är beror på vilken temperatur som metaniseringen sker vid (Hoekman et al., 2010).

Sett ur ett power-to-gas perspektiv är det vanligast i dagsläget att producera vätgas som direkt används som bränsle eller lagras och används i en bränslecell då det råder brist på el. Det är också möjligt att använda vätgas för att producera metan enligt den beskrivna metoden. Ett svenskt exempel på detta är att den planerade vindkraftsutbyggningen på 30 TWh i elnätet beräknas göra det lönsamt att årligen producera 200-300 Nm<sup>3</sup> metan (ÅF, 2013). Detta motsvarar omkring 20% av det faktiska kolbehovet för eten- och propenproduktionen i Sverige idag.

## Faktaruta - CCS/ CCU

Sabatierreaktionen i den katalytiska metaniseringen använder koldioxid som råvara. Att använda koldioxid som råvara är en följd av de senaste decenniernas arbete i att minska klimatförändringarna och utsläppen av växthusgaser. Från början fokuserades klimatarbetet på att minska utsläppen men på senare år har även en del forskning och utveckling lagts på att istället fånga in koldioxid från källor med höga utsläpp, så som oljedrivna kraftverk. Idén, som kallas Carbon Capture and Storage/ Sequestration, CCS, är att fånga in koldioxid och sedan lagra den i berggrunden. I Sverige produceras elen framförallt av vattenkraft och kärnkraft varpå koldioxidutsläppen från elproduktionen inte är betydande, men i USA står elproduktionen för cirka 40% av landets totala koldioxidutsläpp (EIA, 2011; Energimyndigheten, 2013). CCS har en rad ekonomiska och tekniska svårigheter, bland annat krävs det mycket energi för att pumpa ner koldioxid i berggrunden, vilket bidrar till ökad elproduktion och ökade kostnader för elproduktionen. Dessutom finns det i vissa länder ett stort motstånd för CCS hos den allmänna opinionen. Man tycker inte att det är en långsiktig lösning på klimatproblemet och vill inte ha koldioxid i marken nära där man bor, då man är rädd att den ska läcka upp (Hoekman, Broch, Robbins, & Purcell, 2010). Senaste nytt från Norden är att Danmarks geologiska undersökning håller på att sammanställa data från Norge, Sverige, Island och Danmark för att skapa en atlas som visar var och hur mycket koldioxid man kan lagra i respektive land. Denna atlas är menad att ligga till grund för beslut som politiska satsningar på CCS. Enligt Karen Lyng Anthonsen, en av forskarna bakom projektet, har Sverige potential att lagra motsvarande sju år av EUs sammanlagda utsläpp (Abrahamsson, 2015).

Som alternativ till att förvara koldioxid i berggrunden har man istället börjat använda den som råvara. Det kallas CCU, Carbon Capture and Usage. CO<sub>2</sub>-konferensen handlade om just detta och där var många representanter från myndigheter, företag och akademien som talade om att de ville förändra synen på koldioxid från oönskad växthusgas till användbar råvara. Idag används globalt redan cirka 145 Mton koldioxid som råvara, främst för produktion av urea som konstgödsel. Ureaproduktionen består av ammoniak och koldioxid, där koldioxid samlas in från ammoniakproduktionen. I mycket mindre grad används koldioxid också som råvara för produktion av metanol, cykliska kolväten och acetylsalicylsyra (Carus, 2014).

### 5.3 *Dagens elbehov vid metanisering*

Sabatierreaktionen har den högsta effektiviteten vid arbetstemperaturer på 300-350°C, i detta intervall omvandlas cirka 60% av den ingående koldioxid till metan. Denna effektivitet uppnås med ett molförhållande på H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> på 4/1 i det ingående flödet. En något högre omvandling kan ske om koncentrationen av vätgas höjs, men en effektiv användning av resurserna uppnås vid det tidigare nämnda molförhållandet (Hoekman et al., 2010).

För att uppskatta elbehovet för metanisering har data från två tyska ledande metaniseringföretag Etogas och Sunfire studerats. Etogas har tre anläggningar i Tyskland

som uppgraderar biogas genom metanisering och deras nyaste och största anläggning har en effekt på 6 MW (Benjaminsson et al., 2013). Den insatta effekten, 6 MW, fördelat på de 353 dagar som anläggningen är i drift, resulterar i 51 GWh, se Formel 5.2. För att räkna ut det totala elbehovet antas driften vara igång 353 dagar om året, detta i enlighet med uppgifter om att Etogas anläggning kräver driftstopp för utbyte och rengöring av katalysatorer cirka 12 dagar om året (Benjaminsson et al., 2013).

$$6MW \cdot 353 \text{ dag} \cdot 24 \text{ h/dag} = 51 \text{ GWh} \quad (5.2)$$

Den producerade mängden metan är 25 GWh/år, och då 1 Nm<sup>3</sup> metan har ett energiinnehåll på 9,97 kWh (Pollet, (n/a)) motsvarar det en produktion på 2,6 MNm<sup>3</sup>, se Formel 5.3.

$$\frac{25 \text{ GWh}}{9,97 \text{ kWh/Nm}^3} = 2,5 \text{ MNm}^3 \quad (5.3)$$

Det totala elbehovet per producerad kubikmeter metan bli så kvoten av den använda mängden el och den producerade mängden metan: 20 kWh/Nm<sup>3</sup>, se Formel 5.4.

$$\frac{51 \text{ GWh}}{2,5 \text{ MNm}^3} = 20 \text{ kWh/Nm}^3 \quad (5.4)$$

Det tyska företaget Sunfire levererar integrerade elektrolys-metanisering-anläggningar och planerar att leverera en anläggning där värmen från Sabatierreaktionen i den katalytiska metaniseringen ska leverera värme till fastoxidcellselektrolysen, SOEC. Sunfire uppger att den planerade SOEC-tekniken kommer finnas tillgänglig till år 2016 och då kommer deras power-to-gas anläggningar ha en effektivitet el-till-metan på 80%. I nuläget använder de alkalisk elektrolys och verkningsgraden är därför lägre, omkring 55%.

Enligt de produktionsdata som publicerats på Sunfires hemsida, och som bekräftats i korrespondens med en av deras ingenjörer har deras planerade SOEC-metananläggning en elbehov på 13 kWh/Nm<sup>3</sup> metan. Detta utifrån att anläggningen har en effekt på 250 kW och producerar 600 Nm<sup>3</sup>/ dag, vilket med en effekt på 80% resulterar i ett elbehov på 13 kWh/Nm<sup>3</sup> metan, se Formel 5.5. Effektiviteten med dagens alkaliska elektrolys med en verkningsgrad på 55%, resulterar med samma formel i ett elbehov på 18 kWh/Nm<sup>3</sup> (Sunfire, 2014a).

$$\frac{250 \text{ kW} * 24 \text{ h/dag}}{0,8 * 600 \text{ Nm}^3/\text{dag}} = 13 \text{ kWh/Nm}^3 \quad (5.5)$$

I Sunfires elbehov är också produktionen av vätgas inräknad, och anledningen till att det blir så mycket effektivare än Etogas är den integrerade lösningen där värmen används inom samma process.

Beroende på vilket scenario man väljer behövs olika mängd metan och således el, se Formel 5.6. För tekniken som Sunfire planerar att ha klar år 2016 är elbehovet för scenario ett, två och tre: 1480 TWh, 740 TWh respektive 2220 TWh. Elbehovet för alla tre teknikerna presenteras i Tabell 4. I Figur 13, se avsnitt 5.4, finns även en grafisk presentation där Sunfires teknik och elbehov i dagsläget jämförs med 2050-års teknik och elbehov.

$$13, 18 \text{ eller } 20 \frac{kWh}{Nm^3} \cdot V_{metan} Nm^3 = \text{Förbrukad el TWh} \quad (5.6)$$

Volymen metan har räknats ut utifrån hur mycket kol som behövs i de olika scenarierna med hjälp av allmänna gaslagen, och presenteras även det i Tabell 4. Om det var så att all metan som producerades omvandlades till eten eller propen skulle det behövas 23, 47 och 70 Gm<sup>3</sup> metan, men eftersom framställningen av eten och propen inte är 100% effektivt utan även producerar biprodukter kommer det behövas 59, 118 och 178 G m<sup>3</sup> metan för att tillgodose kol- och vätebehovet för de tre scenarierna.

Tabell 4: Elbehov för metanproduktion med 2014-års teknik, inklusive vätgasproduktion

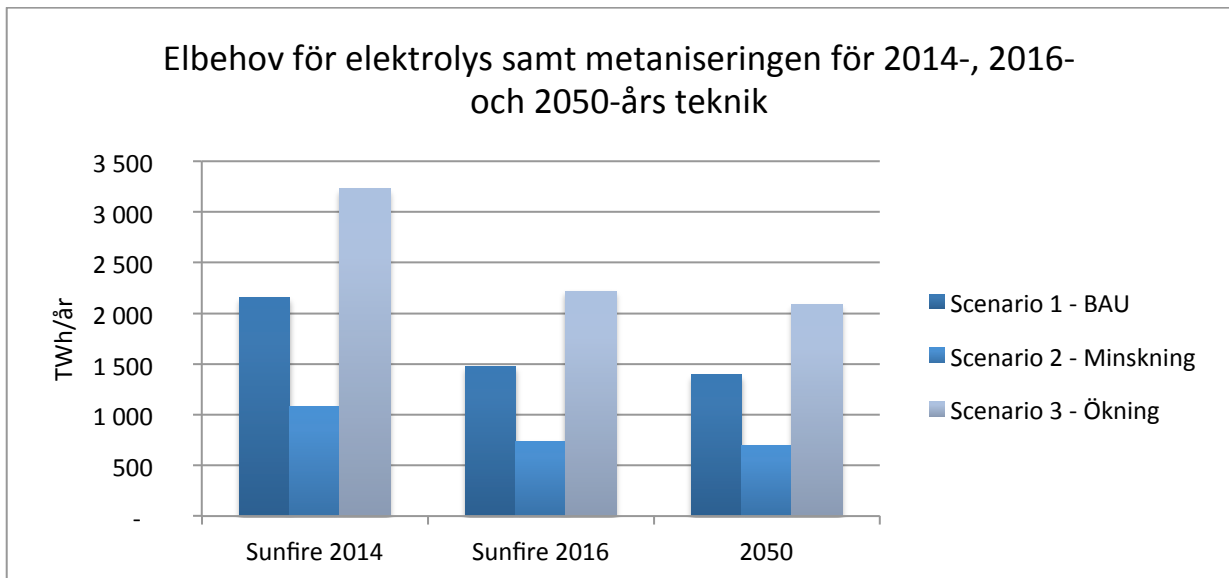
	Metan [G m <sup>3</sup> ]	Etogas 2014 [TWh/år]	Sunfire 2014 [TWh/år]	Sunfire 2016 [TWh/år]
Scenario 1 - BAU	118	2 400	2 153	1 480
Scenario 2 - Minskning	59	1 200	1 076	740
Scenario 3 - Ökning	178	3 600	3 229	2 220

## 5.4 Elbehov för elektrolys samt metanisering år 2050

Den metaniseringsprocess som Sunfire beräknar ha klar till försäljning år 2016 ligger nära det teoretisk lägsta möjliga, men antas effektiviseras ytterligare något till år 2050. Idag är effektiviteten 80% och den teoretiskt högsta är 90%. I denna studie antas att effektiviteten höjas till 85% till år 2050. Elbehovet ligger på 12,5 kWh/Nm<sup>3</sup> metan med 2016-års teknik och den förväntas sjunka till 12 kWh/Nm<sup>3</sup> metan till år 2050.

I Figur 13 visas elbehovet för tre olika års tekniker, först presenteras dagens metanisering med den alkaliska elektrolysen, sen 2016-års metanisering med SOEC-elektrolys och sist 2050-års metanisering med en processeffektivitet på 85%.

Elbehovet för metaniseringsprocessen inkluderar även elbehovet för elektrolysen. Det sammanlagda elbehov för att producera fossilfri metan år 2050 beräknas ligga mellan 700 och 2100 TWh, se Figur 13. Då den årliga elproduktionen i EU idag är cirka 3300 TWh motsvarar elbehovet med 2050-års teknik cirka 40%, 20% respektive 65% av den årliga elproduktionen i EU.



Figur 13: Elbehov för dagens, 2016-års och 2050-års elektrolys- och metaniseringsprocess

## 6. Oxidative Coupling of Methane

Dagens tillverkning av eten sker via nafta från råolja eller naturgas. I detta kapitel beskrivs Oxidative Coupling of Methane (OCM) som är en fossilfri tillverkningsmetod där metan oxideras till eten. Även det elbehov [TWh] som krävs för att tillgodose EU:s etenbehov år 2050 presenteras.

### 6.1 Val av metod

I en stor studie om petrokemikalier konstaterades det att användningen av metan som råvara för att tillverka eten och propen ännu inte är kommersiellt tillgänglig. Det pågår forskning inom området och kommersiell produktion förväntas någon gång mellan år 2030 och år 2050. I denna studie beskrivs olika tillvägagångssätt för att tillverka eten, både konventionella och icke-konventionella. I det konventionella tillverkas baskemikalierna av fossila råvaror och bland de icke-konventionella finns både metan- och biobaserade tillverkningsmetoder. Det kan konstateras att de metanbaserade metoderna är energieffektivare än de biobaserade, men att växthusgasutsläppen är mindre för de biobaserade metoderna (Ren & Patel, 2009). Eftersom denna studie fokuserar på att tillverka fossilfria kolväten från el, vatten och koldioxid behandlas inte de biobaserade metoderna, utan enbart de som är metanbaserade, alltså Oxidative Coupling of Methane, OCM.

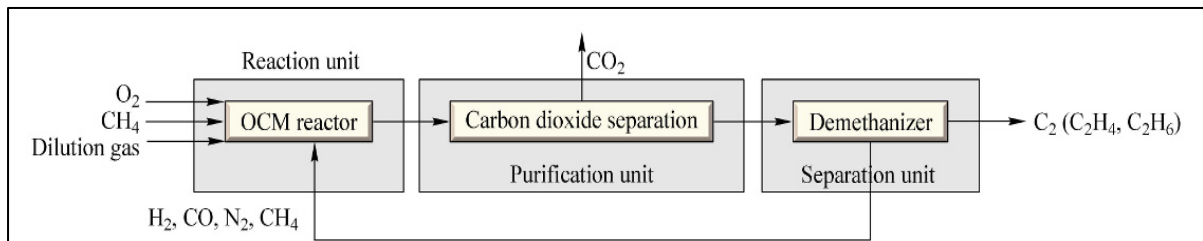
Fischer-Tropsch-tekniken som tidigare nämnts i avsnitt 5.1 bildar en blandning av kolväten med kolmonoxid och vätgas som råvaror och kan således även bilda eten. Denna metod har valts bort på grund av den låga selektiviteten. Ytterligare en metod som valts bort på grund av dess låga selektivitet är metanol till olefiner, MTO. Det går att läsa mer om både Fischer-Tropsch, MTO och biobaserade tillverkningsmetoder för eten och propen i avsnitt 7.5.1.

### 6.2 Grunderna i Oxidative Coupling of Methane

Att tillverka andra kolväten med metan som grund kallas för C1-metoder, för att metan består av en kolatom. Som ett led i sökandet av nya metoder för att tillverka baskemikalier, exempelvis eten och propen, har C1-metoder fått mycket uppmärksamhet. Det finns i huvudsak två olika C1-metoder, antingen sker omvandlingen från metan direkt eller via intermediär, exempelvis etan eller etanol. Här behandlas C1-metoden Oxidative Coupling of Methane, OCM, som är en direkt och exoterm process, utan intermediärer eller termodynamiska begränsningar (Ren et al., 2008).

En OCM-anläggning består av tre delar: en OCM-reaktor, en koldioxidrenare och en C2-avskiljningsenhet. En schematisk bild kan ses i Figur 14, där händelseförloppet beskrivs med hjälp av tre boxar. Först reagerar syre och metan, sen avlägsnas koldioxid från gasblandningen och sist separeras eten och etan och de återstående gaserna recirkuleras tillbaka till reaktorn.





Figur 14: Schematisk bild av en OCM-process (Jašo et al., 2012)

Processteg ett består i att syre och metan reagerar vid en temperatur på mellan 700-900°C och bildar en gasblandning bestående av: eten, etan, koldioxid, kolmonoxid, vatten och vätgas. Processen som helhet bör utformas på ett sådant sätt att de icke önskvärda produkterna som koldioxid och kolmonoxid hålls till ett minimum och att selektiviteten för eten är så hög som möjligt. Reaktorparametrarna som avgör vilka gaser som bildas och med vilken selektivitet är framförallt katalysatorer, temperatur och tryck (Daneshpayeh et al., 2009).

Efter att reaktionerna skett kyls gaserna ner till cirka 40°C innan de går vidare till processteg två, reningssteget. I reningssteget avlägsnas all koldioxid med hjälp av två skrubbar. En skrubber är en luftrenare som genom att spraya in vatten på luftströmmen renar luftströmmen. Reningen åstadkoms genom att de oönskade partiklarna och sotet blir tunga då de blir blöta och därför faller ner, medan den rena luftströmmen fortsätter uppåt. I OCM-anläggningens fall renas luften genom att koldioxid reagerar med skrubbevätskan som då inte bara består av vatten utan även innehåller reaktanter. För att uppnå en hög renhet används två skrubbar, först en kväveskrubber och sen en natriumhydroxidskrubber. När gaserna går in i reningsprocess två innehåller de cirka 60 mol% koldioxid, men när den lämnat den andra skrubbern innehåller den nästan ingen koldioxid alls (Salerno, Arellano-Garcia, & Wozny, 2011).

I det sista processteget, separationen, separeras eten och etan från flödet med hjälp av destillationskolonner. Destillering går ut på att avskilja olika komponenterna i ett flöde. Flödet värms upp, avskiljs och kondenseras ner. Då olika ämnen har olika kokpunkt är detta ett effektivt sätt att få rena flöden bestående av endast ett ämne. I en OCM-anläggning är den första destillationskolonnen en avmetaniserare som separerar den metan som inte reagerat och återcirkulerar den till processteg ett, reaktorn. Sen separeras produktströmmen i en destillationskolonn som är etanavskiljande som skiljer ut C2-fraktionen, alltså både eten och etan. Processen resulterar i mycket rena fraktioner och är på så sätt effektiv, men den kräver mycket energi. För att minska energianvändningen används värmeväxlare mellan de utgående varma produkterna och de kalla ingående samt god isolering av kolonnen (Salerno et al., 2011).

På grund av bristande ekonomisk lönsamhet finns det i dagsläget ingen OCM-anläggning i industriell skala. Förbättringar som krävs är en aktiv, selektiv och stabil katalysator. Grunderna för forskningen kring OCM-katalysatorer lades i början på 80-talet av två forskargrupper (Keller & Bhasin, 1982) och (Hinsen & Baerns, 1983) som konstaterade att en katalysator ska vara en metalloxid och ligga mellan grupp 3-5 i det periodiska systemet. Den stabilaste katalysatorn som hittats idag är  $Mn-Na_2WO_4/SiO_2$ , ett ämne som har en komplex struktur och trots att forskning genomförts vet man ännu inte hur den aktiva ytan är uppbyggd. Det man testat och vet är att  $Mn-Na_2WO_4/SiO_2$  är stabilt och fungerar bra även vid OCM:s höga arbetstemperatur och att den ger en C2-selektivitet på 70-80% och en metanomvandling på 20-30% (Arndt et al., 2012).

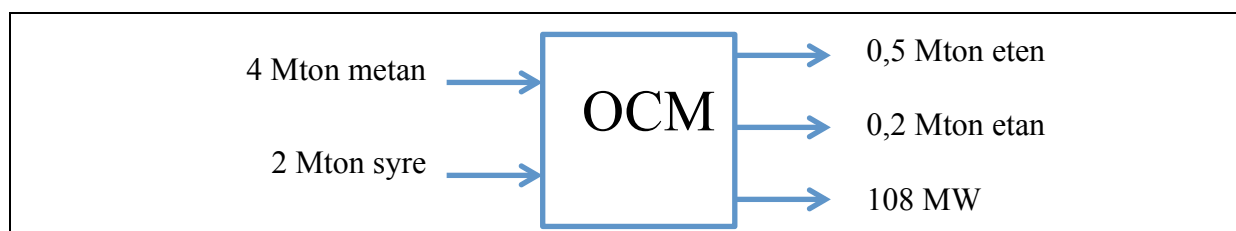
Förutom problematiken kring katalysatorer är ett annat hinder för att OCM ska bli tillgängligt i industriell skala det faktum att det är termodynamiskt mer gynnsamt för metan att oxideras till koldioxid, som i Reaktion 6.1, än att bilda den sökta gasen eten som i Reaktion 6.2 (Arndt et al., 2012).



### 6.3 Dagens användning av OCM

Tekniken som används på OCM-anläggningar genomgår omfattande forskning och utveckling. Sen några år tillbaka finns den första pilot-OCM-anläggning vid det Tekniska universitetet i Berlin, Tyskland. Anläggningen är byggd av forskare som analyserar, utvecklar och designar katalysatorer och forskningen på anläggningen handlar i huvudsak om vilka katalytiska egenskaper som kan få selektiviteten för eten kan öka. Anläggningen är ett första steg i att gå från laborieförsök till en framtida industriell applicering av OCM-tekniken och projektet får även ekonomiskt stöd av industrin (TU-Berlin, 2014). Utöver forskning på katalytiska egenskaper undersöks reaktions- och separationsförbättringar för att uppnå ökad C2-selektivitet och ökad konvertering av metan (Stünkel et al., 2012). Då koldioxid ses som en oönskad biprodukt i OCM-sammanhang och då det krävs energi för att separera gaserna är det viktigt för en framtida industriell applicering att detta sker energieffektivt. Hittills har en koldioxidavskiljare på 10 dm<sup>3</sup> installeras i TU-Berlins anläggning som lyckas separera 2,3 kg CO<sub>2</sub>/ timme (Salerno et al., 2011).

Utöver pilotanläggningen i Berlin finns en planerad storskalig OCM-anläggning i Baytown, Texas, USA. Den kommer att vara belägen intill ett petrokemikluster där den producerade mixen av eten och etan är en eftertraktad råvara. De planerar att tillverka 0.5 Mton eten per år och 0.2 Mton etan per år, se Figur 15. De planerar att processen ska ha en input på 4 Mton metan och 2 Mton syre för att bilda eten/etan mixen och ett överskott på 108 MW el som ska distribueras på elnätet (Fini, Patz, & Wentzel, 2014).



Figur 15: Schematisk skiss över en planerad OCM-anläggning i Baytown, Texas.

Elektriciteten som produceras på anläggningen genereras av den metan om inte reagerar i reaktorn. Gasen förbränns och värmer vatten till vattenånga. Ångan passerar en turbin som omvandlar rörelseenergin till elektrisk energi. Totalt produceras en effekt på 111 MW, men då

anläggningen använder 3 MW för pumpar, uppvärmning etc. återstår det 108 MW för försäljning till nätet (Fini et al., 2014).

Att OCM- anläggningen inte kommer köpa någon el betyder att enheten som används genomgående i rapporten, kWh/ Nm<sup>3</sup> produkt, inte är en lika naturlig enhet att mäta energibehovet i. Det kan också tolkas som att den el som används i produktionen av den el som skapas är den energi som krävs för att skapa slutprodukten. Alltså att det behövs en effekt på 3 MW för att skapa 0,5 Mton eten under ett år. Med samma antaganden som tidigare att ett år har 353 driftdagar och att genom allmänna gaslagen räkna ut att 1 Mton eten har en volym på  $800 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , nås resultatet att elbehovet i OCM-anläggningen med 2014-års teknik är 0,06 kWh/Nm<sup>3</sup> eten. I Tabell 5 presenteras det totala metan- och elbehov för att tillfredsställa 2050-års etenproduktion med 2014-års teknik. Det totala årliga elbehovet är lågt och varierar mellan 0,4-1,3 TWh.

Tabell 5: Metan- och elbehov för att tillfredsställa etenproduktionen med 2014-års teknik, exklusive elbehov för elektrolys och metanisering.

		TU-Berlin 2014	Elbehov
	Eten [Mton]	Metan [Mton]	[TWh]
Scenario 1 - BAU	16	75	0,8
Scenario 2 - Minskning	8	37	0,4
Scenario 3 - Ökning	25	112	1,3

En viktig skillnad mellan den undersökta framtida fossilfria kolvätetillverkningen i EU och den ovan beskrivna anläggningen i Baytown, Texas, är att ingående metan inte kommer att vara fossil naturgas. Den metan som används kommer att vara fossilfri och producerad från elektrolys och Sabatierreaktion.

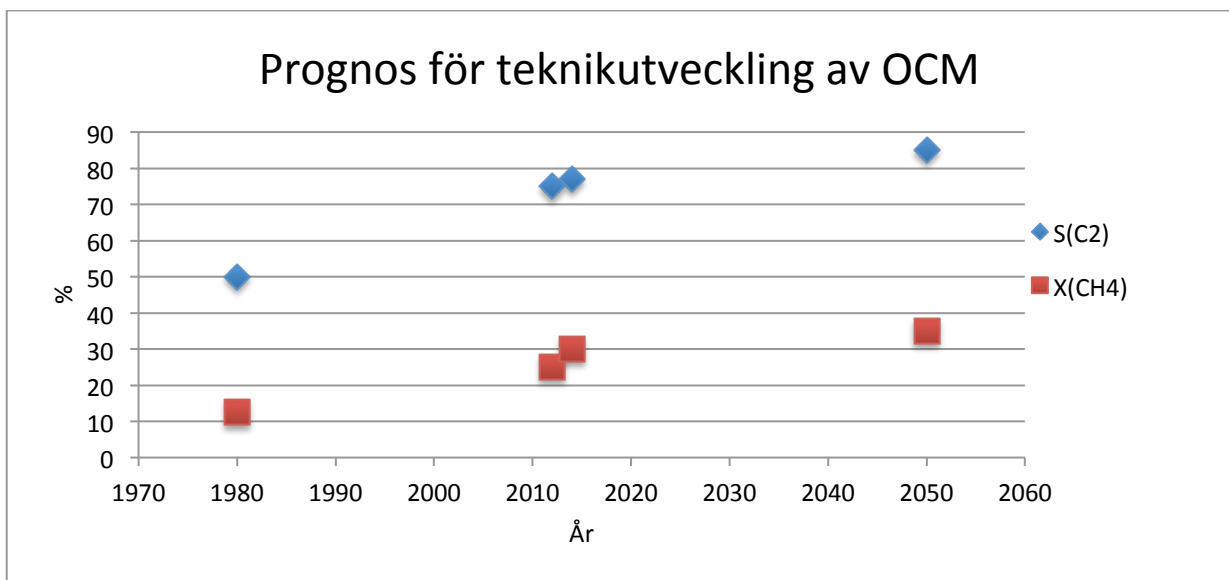
## 6.4 Användning av OCM år 2050

Forskning och utvecklingen kring OCM pågår och då nya katalysatorer fortfarande förbättras och utvecklas är det svårt att göra antaganden kring hur processen kommer se ut år 2050. Som tidigare nämnts är den låga selektiviteten för eten ett av de största problemen för OCM. I ett OCM-experiment från början av 80-talet testades olika katalysatorers effekt på reaktionen och med de effektivaste katalysatorerna uppnåddes en metanomvandling på 10-15%, en C2-selektivitet på runt 50% och selektiviteten för eten var ungefär 2 gånger mer än etan (Keller & Bhasin, 1982). Sedan dess har utvecklingen med katalysatorer fortsatt och används den stabilaste katalysatorn idag, Mn-Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>, kan man uppnå en metanomvandling på 20-30% och en C2-selektivitet på 70-80%. (Arndt et al., 2012).

Etenfaktorn varierar mellan 2-5, det vill säga att det produceras 2-5 gånger mer eten än etan (Ahari, Sadeghi, & Zarrinpashne, 2011; Jašo et al., 2012). I mailkorrespondens med en av världens ledande experter inom OCM vid TU-Berlin, Prof. Dr. Reinhard Schomäcker, uppgavs att dagens state-of-the-art teknik ger en metanomvandling på 30% och en C2-selektivitet på 75-80%. Vidare uppgavs att dehydrogenering inte är ett problem, alltså att ta bort vätet från etan och på så sätt bilda eten, och att en etenfaktor på 9 var möjlig

(Schomäcker, 2014). I Figur 16 finns ovanstående siffror illustrerade där X är omvandling och S är selektivitet.

Om priset på fossil metan är fortsatt lågt i USA kommer forskningen och utvecklingen efter nya katalysatorer att fortsätta. Lyckas man utveckla katalysatorer som ger högre omvandling av metan och högre selektivitet för eten blir det mer intressant rent ekonomiskt att investera i denna typ av anläggning (Fini et al., 2014). Även om det som driver OCM-utvecklingen nu bygger på fossil naturgas, drivs den ändå framåt vilket gynnar den fossilfria användningen till år 2050. Resonemanget om fortsatt forskning och utveckling kring katalysatorer, separationsprocesser och termodynamiska förhållanden gör att produktionsparametrarna kommer fortsätta förbättras och selektiviteten fortsätta öka. I denna studie antas att metanomvandlingen kan stiga från 20-30% till 35% och C2-selektiviteten öka från 70-80% till 85%. Dessutom antas att etenfaktorn kommer vara likvärdig med den idag högst uppmätta, alltså 9 gånger etanproduktionen.



Figur 16: Prognos för teknikutveckling för OCM från 80-talet fram till år 2050. X: omvandling och S: selektivitet.

Den låga metanomvandlingen gör att det måste produceras mycket mer metan än vad som kommer omvandlas till eten, vilket även påverkar vätgasproduktionen. År 2050 antas metanomvandlingen vara 35% och selektiviteten för C2 vara 85%, detta resulterar i att för varje ton metan som går in i processen bildas 0,30 ton eten och etan. När metan omvandlas bildas en blandad kolvätefraktion, mestadels bestående av C2, men även till viss del högra kolväten. Benämningen C2<sub>+</sub> betyder därför C2 och andra större kolväten.

$$1 \text{ ton } CH_4 * 0,35 = 0,35 \text{ ton } C2_+$$

$$0,35 \text{ ton } C2_+ * 0,85 = 0,30 \text{ ton } C2$$

Sist tas etenfaktorn för eten med i beräkningarna och då den antas vara 9 blir slutresultatet att för varje ton metan bildas 0,27 ton eten. Etenfaktorn är uträknad via ett ekvationssystem där:

$$m_{eten} + m_{etan} = 0,30 \text{ ton}$$

$$m_{eten} = 9 * m_{etan}$$

vilket resulterar i att:

$$m_{eten} = 9 * \frac{0,30}{10} = 0,27 \text{ ton}$$

För att tillfredsställa de olika scenarierna behövs olika mängd metan. Tekniken som ska byggas i Baytown, Texas, väljs inte här då den är långt från vad som idag är bästa tillgängliga teknik och resulterar i ett metanbehov på mellan 70-200 Mton. Den bästa tekniken idag resulterar istället i ett metanbehov på mellan 40-110 Mton och med teknikantaganden om framtiden resulterar 2050-års teknik i ett metanbehov på mellan 30-90 Mton metan.

Då elbehovet i en OCM-anläggning är lågt antas att detta inte kommer effektiviseras märkvärt. Allting tenderar ändå att utvecklas och i denna studie antas att elbehovet i etenproduktionen kommer minska från 0,06 kWh/Nm<sup>3</sup> till 0,05 kWh/Nm<sup>3</sup>. Det totala elbehovet för att tillfredsställa 2050-års etenproduktion i EU beräknas ligga på 0,7 TWh, 0,3 TWh och 1,0 TWh för scenario ett, två respektive tre, se Tabell 6.

Tabell 6: Metan- och elbehov för att tillfredsställa etenproduktionen med 2050-års teknik

	Eten [Mton]	Metanbehov [Mton]	Elbehov [TWh]
Scenario 1 - BAU	16	61	0,7
Scenario 2 - Minskning	8	31	0,3
Scenario 3 - Ökning	25	92	1,0

## 7. Metanol-till-propen

För att tillverka propen finns det färre alternativ och mindre forskning än för etentillverkning. Detta kapitel beskriver en tillvägagångsmetod där propen bildas från metan som råvara. Dessutom presenteras elbehovet [TWh] för att tillverka all propen i EU år 2050 med denna metod för de tre givna scenarierna.

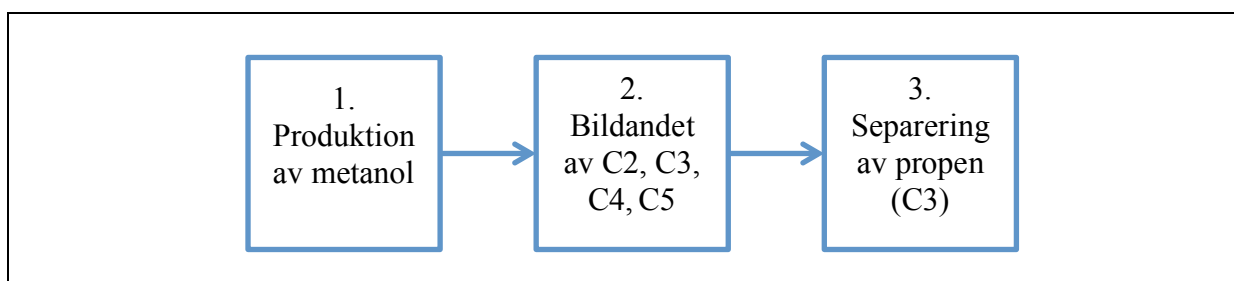
### 7.1 Val av metod

Den tidigare beskrivna OCM-tekniken fungerar bara för att tillverka eten men inte propen. När det kommer till propen bedöms direkta metoder saknas idag varför en metod med intermediärer valts. Då propen är ett längre kolväte krävs det en mer komplex tillverkningsmetod än för eten.

Metanol kan fungera som en intermediär för att bilda olefiner, metoden kallas MTO, methanol-to-olefins. Då det bara är propen som söks, och inte olefiner i allmänhet, har en tillverkningsmetod som kallas MTP methanol-to-propylene, alltså metanol till propen valts. I 7.5 beskrivs alternativa tillverkningsmetoder för propen och eten, via Fischer-Tropsch, naturgas eller MTO.

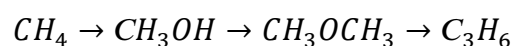
### 7.2 Grunderna i MTP

Metanol till propen, MTP, består av tre steg; metanolproduktion från metan, omvandling från metanol till olefiner samt separering och produktutvinning. I Figur 17 ses en schematisk bild över reaktionsförloppet.



Figur 17: Schematisk bild över propentillverkningens tre huvudsteg

MTP-processen består av en lång rad reaktioner och intermediärer och i reaktionsflödet nedan ges en överblick över de viktigaste. Metan bildar metanol som blir DME som till sist blir den sökta produkten propen. Utöver de önskade produkterna bildas en del oönskade biprodukter. I huvudsak är det vatten samt oönskade kolväten som bensen och butan (Ren et al., 2008).



### *Metan → Metanol → DME → Propen*

Metanolproduktionen i det första processteget sker genom att metan i två steg omvandlas till syntesgas som sedan bildar metanol. Metan genomgår först en för-omvandlingsreaktion där den delvis omvandlas till syntesgas. Detta sker för att minska eventuellt bildande av koks i de nästkommande stegen. Den metan som inte omvandlats i första steget bildar sedan syntesgas i en autotermisk reaktor med en temperatur på cirka 1000°C. Den autotermiska reaktorn består i sin tur också av två steg, först en icke-katalytiskt exoterm process där metan ytterligare delvis oxideras till syntesgas, därefter en endoterm katalytisk ångomvandlingsprocess där återstående metan omvandlas vidare till syntesgas. När all metan blivit syntesgas omformas syntesgasen till råmetanol, det vill säga metanol som fortfarande innehåller vatten. Detta sista omvandlingssteg från syntesgas till metanol är exotermt och sker vid en temperatur på mellan 200-280°C. Allt detta sker i processteg ett, där metan alltså omvandlas till metanol via syntesgas (Ren et al., 2008).

Metanol går så vidare till steg två i propenproduktionen, omvandlingen till olefiner. Beroende på vilken katalysator som används bildas olika olefiner. Värmen från den ovan beskrivna exoterma metanolsyntesen används för att omvandla metanolen till dimetyleter, DME och vatten. DME omvandlas till olefiner, mestadels propen, genom en syntesreaktion. För att gynna bildandet av propen tillsätts en zeolit-kiselbaserad katalysator, ZSM. ZSM-katalysatorn är doppad i metaller som mangan, antimon, magnesium eller barium samt har i likhet med katoderna vid elektrolys en porös yta. I processteg två omvandlas således metanol till främst propen men även andra olefiner via intermediären DME (Ren et al., 2008).

I det tredje och sista processteget separeras olefinerna beroende på storlek, alltså hur många kolatomer de innehåller. Först kyls flödet ner och sedan separeras kolvätena i en destillationskolonn, där de olika storleksfraktionerna kommer ut i rena strömmar. Slutligen för att öka uttaget av propen låter man de C5 och C4 kolväten som bildas delas till eten och propen (Ren et al., 2008). I detta sista processteg uppnås slutligen ett rent flöde med propen.

### **7.3 Dagens elbehov för MTP**

I dag finns två fungerande MTP-anläggningar i nordöstra Kina, de drivs av det franska bolaget Air Liquide, med teknik som är utvecklad av det numera uppköpta tyska företaget Lurgi. Deras MTP-teknik är den enda som hittills finns på kommersiellt fungerande industriell skala (Intratec, 2014).

Det effektiva värmevärdet av propen är 47 GJ/ ton, vilket innebär 13 000 kWh/ ton propen. Då råvaran metan redan innehåller 13 900 kWh/ ton behöver inte all energi komma från el, som i fallet med väte från elektrolys (IEA, 2004).

Att bilda propen via MTP har ett elbehov på 171 kWh/ ton propen (Intratec, 2014). Detta innebär ett elbehov på bara 0,32 kWh/Nm<sup>3</sup> propen. I Tabell 7 presenteras det totala elbehovet för att tillgodose 2050 års propenproduktion i EU med 2014-års teknik. Beroende på scenario kommer det att variera mellan 1-3 TWh, en väldigt låg siffra jämfört med för de övriga stegen i denna fossilfria kolväteproduktion.

Tabell 7: Elbehov för att tillgodose 2050-års propenproduktion i EU med 2014-års teknik, exklusive elbehov för elektrolys och metanisering.

	Propen [Mton]	Elbehov [TWh]
Scenario 1 - BAU	13	2,2
Scenario 2 - Minskning	6	1,1
Scenario 3 - Ökning	19	3,3

Omvandlingen i massa för dagens anläggningar är 46%. Detta innebär att massan av den propen som lämnar anläggningen är 46% av den massan metan som går in som råmaterial (Ren et al., 2008). För att tillgodose de tre scenarierna på 6, 13 och 19 Mton propen krävs således en input på 14, 28 och 42 Mton metan.

#### **7.4 Elbehov för MTP år 2050**

När det gäller MTP är det inte elbehovet i första hand som är den stora kostnaden eller resursåtgången (Intratec, 2014). Det är därför snarare troligt att selektiviteten kommer ökas, så att bränslekostnaderna minskar. Dock kommer det säkert ske en viss effektivisering gällande elbehov också varpå den antas sjunka från 171 kWh/ton till 160 kWh/ ton, motsvarande 0,30 kWh/Nm<sup>3</sup> propen. Detta i sin tur resulterar i ett elbehov som presenteras i Tabell 8. Det totala resultatet är snarlikt det för med 2014-års teknik och resulterar även den i ett totalt elbehov på mellan 1-3 TWh.

Tabell 8: Elbehov för att tillgodose 2050-års propenproduktion i EU med 2050-års teknik, exklusive elbehov för elektrolys och metanisering.

	Propen [Mton]	Elbehov [TWh]
Scenario 1 - BAU	13	2,1
Scenario 2 - Minskning	6	1,0
Scenario 3 - Ökning	19	3,1

En aspekt som påverkar produktionen och elbehov i tidigare processer är hur mycket metan som kommer behövas för att tillgodose propenproduktionen. Dagens effektivitet i massomvandling är 46% och då tekniken är under utveckling och installeras i fler och fler anläggningar antas att det kommer att höjas till cirka 55% år 2050. Om man ser till alla högvärdiga kemikalier som produceras med dagens teknik i en MTP-anläggning uppnår den totala massomvandlingen till mellan 57-65% beroende på hur man värderar aromaterna. De högvärdiga kemikalierna är alla olefiner, eten, propen etc. samt aromater. Effektivare katalysatorer och mindre oönskad aromatproduktion kommer att leda till denna processförbättring. Denna ökning i effektivitet resulterar i ett råvarubehov av metan för de tre scenarierna på 12, 24 och 35 Mton metan.



## **7.5 Alternativ eten- och propenproduktion**

Utöver OCM, den direkta tillverkningsmetoden för eten, och MTP för propen presenteras här några alternativa tillverkningsätt.

### **7.5.1 Fisher-Tropsch**

Utöver OCM- och MTP-metoder för att tillverka eten och propen finns ytterligare en direkt metod då metan bildar lättare kolväte, det är en modifierad Fischer-Tropsch reaktion. Med hjälp av gas-to-liquid-processer omvandlas metan till så kallad Fischer-Tropsch nafta. Denna FT-nafta genomgår ångkrackning och bildar en blandning av kolväten, bland annat eten och propen. En fördel är att metoden är en plug-in-lösning som går att applicera på de industriella lösningar som redan finns. (Ren & Patel, 2009). Reaktionen har dock låg selektivitet för lättare kolväten och har en lägre selektivitet för eten och propen än OCM och MTP. På grund av detta används inte metoden i någon större utsträckning (Wang, Xu, & Wang, 2003). Idén med Fischer-Tropsch är över 60 år gammal men problematiken med selektiviteten är och verkar förbli olöst ett tag till. Intresset för den modifierade Fischer-Tropsch-metoden är lågt och det publiceras få artiklar på ämnet (Ren et al., 2008).

### **7.5.2 Naturgas**

Olefiner kan bildas av naturgas, metan, som grund via Methanol-to-olefine, metanol till olefiner. Det sker på ett likande sätt som när MTP bildar propen från metan, med skillnaden att MTO bildar en blandning av olefiner. I övrigt är det samma indirekta metod och förfarandet, men med katalysator som istället gynnar etenbildning. Katalysatorn som används består exempelvis av mangan eller nickel och gynnar lättare olefiner som eten. Precis som med MTP är det alltså metan som bildar metanol som omvandlas till dimetyleter (DME) och vidare till mestadels eten men även andra olefiner. Till sist separeras flödet i destillationskolonner och man får ut de rena produkterna. Det finns pilotanläggningar, bland annat i Norge och några större anläggningar har planerats i Afrika, men det har inte rapporterats om några kommersiellt fungerande idag (Ren et al., 2008).

### **7.5.3 Biobaserad**

Utöver de metoder som beskrivits finns det biologiska metoder som använder biomassa som råvara. Biomassan omvandlas till etanol, som i sin tur dehydreras till eten, som polymeriseras till biobaserad PE (Ren & Patel, 2009). Denna metod är välbeprövad och finns i industriell skala på flera platser globalt. I avsnitt 2.5.2 står det mer om användningen av biobaserade plaster, bland annat Tetra Pak som tillverkar skruvkorkarna i mjölkpaketerna från biobaserad plast från sockerrör i Brasilien.

## 8. Diskussion

Följande diskussion är uppdelad i tre teman: först förslag till eventuella förändringar av processen, sen reflektioner från CO<sub>2</sub>-konferensen och sist en utblick över inställning till fossilfria kolväten.

### 8.1 Förändringar av processen

Varje processteg som sådant finns i mer eller mindre industriell skala, men då den sammansatta processen aldrig testats bör det påpekas att det råder stor osäkerhet kring vad som händer om produktionen skalas upp till den nivå som studerats. Verkningsgrader och elbehov kan komma att ändras. Synergieffekter skulle kunna minska det totala elbehovet då det eventuellt sker processförbättringar om verksamheterna expanderar och integreras.

I elektrolysen skapas vätgas men också syrgas. Detta syre är beskrivet som en biprodukt, men skulle kunna användas som råvara i OCM-processen. Det skapas mer syre i elektrolysen än vad som behövs för OCM-processen<sup>3</sup>. Att syret produceras internt motiverar därför ytterligare att elförbrukningen för syreproduktionen inte inkluderas i beräkningarna. En annan möjlighet för syrgasen är att sälja den. Efter elektrolysen är det en ren och därför eftertraktad produkt. Att sälja syrgas påverkar inte elbehovet som sådant men kan komma att spela en ekonomisk roll och därför påverka chanserna att processen utvecklas kommersiellt.

Även OCM-processen har ett stort flöde av biprodukter. Den metan som inte reagerar i OCM-processen behöver inte användas till elproduktion som rapporten beskriver, utan kan istället recirkuleras eller användas som input för MTP. Om man ändå väljer att producera el skulle den kunna användas internt istället för att säljas till elnätet och på så sätt minska det totala inköpet av el<sup>4</sup>. Professor Schomäcker på TU-Berlin rekommenderar dock varken att oreagerad metan används till elproduktion eller recirkuleras utan istället används till något annan process. Det är en stor andel metan som inte reagerar, så stor att den räcker för att tillgodose metanbehovet för propenproduktionen via MTP<sup>5</sup>. Om denna metan används i MTP skulle det resultera i minskat behov av metanproduktion och därmed minskat totalt elbehov.

Då processen som helhet kräver väldigt mycket el är det inte rimligt att ersätta hela EU:s eten- och propenproduktion med denna metod, men den kan komma att användas i mindre skala. En följd av en ökad användning av intermittenta energikällor som sol-, vind- och vågkraft är att det ibland kommer finnas ett el överskott. Detta leder till mycket låga och ibland negativa elpriser, att använda överskottselen för att producera eten och propen eller andra kolväten är då möjligt. Sverige planerar för 30 TWh vindkraft i elnätet, detta innebär att det med dagens förutsättningar skulle vara lönsamt att producera 200-300 Nm<sup>3</sup> metan vilket motsvarar omkring 20% av det faktiska kolbehovet för eten- och propenproduktionen i Sverige. Då värdet inte inkluderar biprodukterna i tillverkningen är detta något högt räknat, men kan ändå

---

<sup>3</sup> För scenario ett produceras det 340 Mton syre i elektrolysen och det behövs 65 Mton syre i OCM-processen.

<sup>4</sup> För scenario ett, två och tre motsvarande det en besparing på 30, 15 eller 45 TWh.

<sup>5</sup> För scenario ett finns det 43 Mton metan över i OCM-processen och det behövs 23 Mton metan i MTP-processen.

ses som en fingervisning om vilken marknadsandel kolväten från el, vatten och koldioxid kan komma att ha.

## **8.2 CO<sub>2</sub>-konferens**

Utöver de saker som tagits upp i rapporten från CO<sub>2</sub>-konferensen kan ytterligare belysas hur stort intresse och potential det finns i att producera fossilfria kolväten från koldioxid genom att nämna två nätverk. Båda arbetar med samverkan inom CCU, att använda koldioxid som råvara. CO<sub>2</sub>Chem, Carbon Dioxide Utilization Network, är ett globalt nätverk som samlar akademien, industrin och beslutsfattare och fokuserar på användning av koldioxid som ensam kolkälla i produktion av förädlade produkter. Det europeiska nätverket heter SCOT, Smart Carbon Dioxide Transformation, och arbetar med också med industrin, akademien och beslutsfattare. SCOT fokuserar på att sprida kunskap om CCU, få folk i allmänhet att acceptera CCU och eventuellt arbeta fram en märkning för produkter som innehåller koldioxid som råvara. Gemensamt för de båda nätverken och besökarna på CO<sub>2</sub>-konferensen i allmänhet var att de är motståndare till CCS. Det fanns ingen vilja att samarbeta med CCS-nätverk, organisationer eller forskare. För att fånga in koldioxid för råvaruanvändning används samma teknik som utvecklats inom CCS, därför vore det logiskt med ett samarbete mellan CCS och CCU. I både Storbritannien och Tyskland där CCU är störst i dagsläget har befolkningen en väldigt negativ och skeptisk bild av CCS. Detta gör att de som arbetar med CCU inte vill förknippas eller blandas ihop med CCS. För att förhindra detta förslog några talare på CO<sub>2</sub>-konferensen att CCU skulle ändra namn till CDU, Carbon Dioxide Utilization, för att minska associationen till CCS.

Av de plaster och polymerer som presenterades på CO<sub>2</sub>-konferensen var ingen totalt på kol från koldioxid. Ofta baserar tillverkarna sina polymerer på fossila vissa mer reaktiva platser reagerar med koldioxid för att på så sätt förlänger används i huvudsak fossilt kol med inslag av koldioxid. Exempel på företag som tillverka polymera material är Sunfire och Bayer och en mer utförlig presentation andra företag som använder koldioxid som råvara finns i Appendix.

Inte bara akademien och CCU-företag deltog på CO<sub>2</sub>-konferensen, utan även representanter från exempelvis stålindustrin och avfallsförbränningsanläggningar. Deras intresse ligger i att veta vad de kan göra av den koldioxid de emitterar, då de antar att det i framtiden kommer att bli för dyrt att fortsätta släppa ut den.

## **8.3 Intresset för fossilfri plast**

Intresset och potentialen för fossilfri plast som använder koldioxid som råvara finns även i Sverige. I januari 2015 höll IKEM ett seminarium med titeln "Plast från luftens koldioxid". IKEM är en svensk bransch- och arbetsgivareorganisation som verkar inom kemi, plast och materialbranscherna. På seminariet var det tyska företaget Bayer, som även deltog i CO<sub>2</sub>-konferensen, inbjudna för att presentera hur de använder koldioxid i sin delvis fossilfria plasttillverkning (IKEM, 2015).

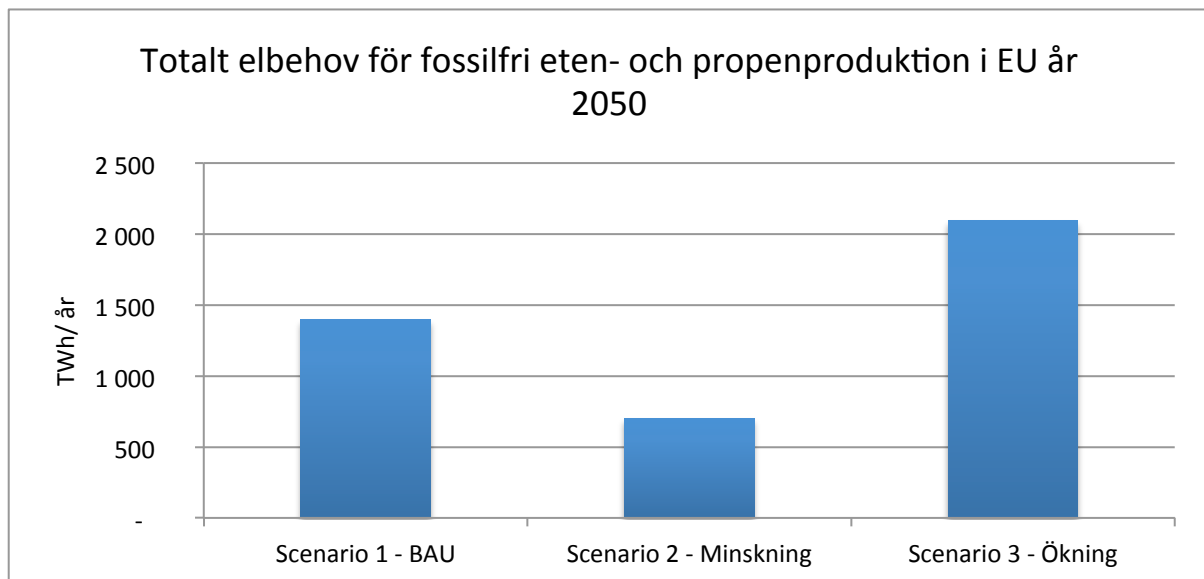
Idag finns det inget företag som använder den i denna studie studerade process i sin helhet, men användningen av koldioxid som kolråvara bedöms öka i framtiden. Om koldioxid används till material, bränsle eller något annat är dock osäkert. Oavsett hur teknikutvecklingen sker eller vilken råvara som användas bedöms den fossilfria kolväteproduktionen att vara ett faktum i EU år 2050. Detta av tre anledningar; i takt med att konsumtionen av fossila bränslen minskar kommer även tillgången på dagens råvara för kolväteproduktion nafta minska, något som leder till att petrokemin kommer behöva byta ut sin råvara. Den andra anledningen är att samhällets alla sektorer på sikt ska vara fossiloberoende, även petrokemin behöver då byta råvara. Den tredje anledningen till att fossilfria kolväten bedöms vara ett faktum år 2050 är att konsumenterna kommer vilja ha klimatsmartare produkter vilket leder tillverkningsindustrin att kräva fossilfria råvaror vilket i sin tur driver petrokemin att tillverka fossilfria kolväten. Alla dessa tre drivkrafter bedöms påskynda produktionen och användningen av fossilfri plast.

## 9. Slutsats

Att tillgodose EU:s årliga eten- och propenproduktion år 2050 på ett fossilfritt sätt baserat på fossilfri el, väte från vatten och kol från koldioxid kräver för tre olika scenarier ett elbehov på 1 400 TWh, 700 TWh respektive 2 100 TWh, se Figur 18.

Elbehovet för de tre scenarierna kan jämföras med EU:s årliga elproduktion på cirka 3 300 TWh. Detta innebär att de olika scenarierna motsvarar cirka 30%, 15% respektive 45% av EU:s årliga elproduktion i dagsläget.

Scenarierna beror på hur kolväteproduktionen och plastanvändningen utvecklas i EU till år 2050. Scenario ett innebär att produktionen förblir oförändrad från idag till år 2050. Scenario två innebär en halvering av kolväteproduktionen i EU tack vare ökad resurseffektivisering, återvinning och minskad plastanvändning. Scenario tre innebär en 50% ökning av kolväteproduktionen som en effekt av plastens ökade betydelse i samhället och ökad kemikalieanvändning i allmänhet.



Figur 18: Totalt elbehov för en fossilfri eten- och propenproduktion i EU år 2050

Processen som studerats är en fossilfri eten- och propentillverkningen i en integrerad elektrolys- och metaniseringsanläggning, där hög energieffektivitet uppnås genom att spillvärmens från Sabatierreaktionen används i fastoxidelektrolysen. Eten tillverkas genom den direkta metoden Oxidative Coupling of Methane, OCM, där metan oxideras till eten. Propen tillverkas via Metanol-till-Propen, MTP, en indirekt metod där propen bildas via olika intermediärer. OCM och MTP har lågt elbehov och påverkar inte slutresultatet nämnvärt, de processer som har högst elbehov är till lika delar elektrolysen och metaniseringen.

I både Sverige och EU planerar petrokemin att bli mer hållbar och övergå till förnyelsebara råvaror. Lite kontraproduktivt arbetas det politiskt både för att behålla den fossila kolväteproduktionen inom EU och med att främja en ökad materialåtervinning för att minska användningen av jungfrulig råvara och således även minska nyproduktion av material.

Eten och propen används framförallt till materialtillverkning och ett fåtal företag, främst i Tyskland, har börjat använda koldioxid som råvara för just materialtillverkning. En bedömning i denna studie är att denna utveckling kommer att fortsätta också på global nivå.

Då metoden kräver väldigt mycket el är det inte rimligt att ersätta hela EU:s eten- och propenproduktion med den. Det är snarare troligt att biomassa kommer ersätta det fossila kolet i fråga. Framförallt kan den studerade metoden komma att vara aktuell då det uppstår elöverskott som en följd av den ökade användningen av intermittenta energikällor. Eten och propen från el, vatten och koldioxid kan således vara ett av alternativen för en fossilfri tillverkning i framtid.

## 10. Efterord

Utöver den forskning som bedrivs och de företag som utvecklat tekniker för att tillverka fossilfria plastmaterial finns det även ett intresse bland konsumenter att minska eller helt sluta använda plast. Ett exempel på detta är att på 2014-års nyordslista fanns ordet plastbanta. Plastbanta innebär att ”minska mängden plast i sin omgivning för att undvika giftiga kemikalier” och används framförallt av föräldrar som vill undvika att deras barn exponeras för tillsatserna i plast. När Institutet för Språk och Folkminnen själva presenterade listan var plastbanta ett av tre ord som fanns representerade (Institutet för Språk och Folkminnen, 2014).

Ett annat exempel på intresset att minska plastanvändningen är en kampanj författaren till denna rapport inspirerades att starta, PlastfriNovember. Det gick ut på att inte köpa något som var plast, eller förpackat i plast, under en månad. PlastfriNovember ville synliggöra problemen som finns med överanvändning av fossilbaserad plast. Kampanjen blev uppmärksam i media och många inspirerades.

Att intresset för att förändra plastanvändningen ökat gör att medvetandet och problematiseringen kring att plast kommer från olja också ökat. Plastbantning kan göras av olika anledningar, dels som definitioner lyder av hälsoskäl för att folk inte vill exponera sig själva eller sina barn för de tillsatser som finns i plast, men det kan också bero på estetiska skäl då många anser att trä, glas eller metall är vackrare än plast och sist också för att minska sin användning av fossila råvaror. Oavsett vilken anledningen är leder denna typ av uppmärksamhet till ett medvetandegörande som förhoppningsvis kan driva fram större strukturella förändringar och väsentligt minskad oönskad plastanvändning.

## 11. Referenser

- Abbasi, T., & Abbasi, S. (2011). Renewable hydrogen: Prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3034-3040.
- Abrahamsson, T. (2015). Ny atlas visar var koldioxid kan lagras i Norden. *Vetenskapsradions nyheter*. Retrieved 05-01-15, from <http://sverigesradio.se/sida/artikel.aspx?programid=406&artikel=6045067>
- Accerergy. (2014). Technology. Retrieved 24-10-14, from [http://www.accelergy.com/technology\\_cbtl.html](http://www.accelergy.com/technology_cbtl.html)
- Ahari, J. S., Sadeghi, M. T., & Zarrinpashne, S. (2011). Effects of operating parameters on oxidative coupling of methane over Na-W-Mn/SiO<sub>2</sub> catalyst at elevated pressures. *Journal of Natural Gas Chemistry*, 20(2), 204-213.
- Andrady, A. L., & Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1977-1984.
- Arndt, S., Otremba, T., Simon, U., Yildiz, M., Schubert, H., & Schomäcker, R. (2012). Mn-Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> as catalyst for the oxidative coupling of methane. What is really known? *Applied Catalysis A: General*, 425, 53-61.
- Balch, O. (2014, 30-05-14). Turning greenhouse gases into mobile phone cases. *The Guardian*. Retrieved 21-10-14, from <http://www.theguardian.com/sustainable-business/blog/greenhouse-gas-mobile-phones-aircarbon>
- Barbir, F. (2005). PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Solar Energy*, 78(5), 661-669.
- Benjaminsson, G., Benjaminsson, J., & Rudberg, R. B. (2013). El till Gas - System, ekonomi och teknik.
- Berreni, M., & Wang, M. (2011). Modelling and dynamic optimization of thermal cracking of propane for ethylene manufacturing. *Computers & Chemical Engineering*, 35(12), 2876-2885.
- Bičáková, O., & Straka, P. (2012). Production of hydrogen from renewable resources and its effectiveness. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(16), 11563-11578.
- Borealis. (2013). Miljörapport 2013.
- Calera. (2014). The process. Retrieved 24-10-14, from <http://www.calera.com/beneficial-reuse-of-co2/process.html>
- Carus, M. (2014, 2-3 december). *Industrial Utilization of CO<sub>2</sub>: Suitable Strategy and Political Framework for Implementation*. Paper presented at the 3rd Conference on Carbon Dioxide as Feedstock for Chemistry and Polymers, Essen.
- Cefic. (2013a). Cefic Energy Roadmap.
- Cefic. (2013b). European chemistry for growth. Unlocking a competitive, low carbon and energy efficient future.
- Daneshpayeh, M., Khodadadi, A., Mostoufi, N., Mortazavi, Y., Sotudeh-Gharebagh, R., & Talebizadeh, A. (2009). Kinetic modeling of oxidative coupling of methane over Mn/Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> catalyst. *Fuel Processing Technology*, 90(3), 403-410.
- Eco2CO<sub>2</sub>. (2014). Project summary. Retrieved 21-10-14, from <http://www.eco2co2.org/>
- EconicTechnologies. (2014). Technology Process. Retrieved 21-10-14, from <http://www.econic-technologies.com/technologies/process/>
- EIA. (2011). Emissions of Greenhouse Gases in the United States 2009.



- EIA. (2014). U.S. Crude Oil First Purchase Price (Dollars per Barrel). Retrieved 9-12-14, from [http://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=F000000\\_3&f=A](http://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=F000000_3&f=A)
- Eldringe, D. (2014, 05-11-14). European plastics industry manifesto targets energy, sustainability, training. *PlasticNews*. Retrieved from <http://www.plasticsnews.com/article/20141104/NEWS/141109978/european-plastics-industry-manifesto-targets-energy-sustainability>
- Elektrolyse. (2014). ELB Elektrolysetechnik GmbH. Retrieved 31-10-14, from [http://elektrolyse.de/wordpress/?page\\_id=36](http://elektrolyse.de/wordpress/?page_id=36)
- Energimyndigheten. (2013). Energiläget 2013.
- EU-kommissionen. (2008). 20 20 by 2020 - Europe's climate change opportunity.
- EU-kommissionen. (2011). Energy Roadmap 2050 COM/2011/0885 final.
- EU-kommissionen. (2013). EU Energy in figures - Statistical Pocketbook 2013. doi: 10.2833/15026
- COM(2014) 910 final. Commission Work Programme 2015 - A New Start (2014a).
- Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directives 2008/98/EC on waste, 94/62/EC on packaging and packaging waste, 1999/31/EC on the landfill of waste, 2000/53/EC on end-of-life vehicles, 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators, and 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment. COM/2014/0397 final - 2014/0201 (COD) (2014b).
- European Council. (2014). EUCO 169/14.
- European Parliament. (2014). Reducing use of plastic bags [Press release]. Retrieved from <http://www.europarl.europa.eu/news/en/news-room/content/20141121IPR79835/html/Reducing-use-of-plastic-bags-MEPs-strike-deal-with-Council-Presidency>
- Eurostat. (2014). Statistics on the production of manufactured goods. Retrieved 2014-09-02, from European Commission [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/prodcom/data/tables\\_excel](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/prodcom/data/tables_excel)
- Fini, T., Patz, C., & Wentzel, R. (2014). Oxidative Coupling of Methane to Ethylene.
- Förpacknings&Tidningsinsamlingen. (2014). FTI:s återvinningsresultat för 2013 överträffar regeringens alla mål [Press release]. Retrieved from <http://www.ftiab.se/download/18.2346de0b147d5ed9e32432/1409116891048/2013%2B%C3%A5tervinningsresultat.pdf>
- Gilliam, R., Graydon, J., Kirk, D., & Thorpe, S. (2007). A review of specific conductivities of potassium hydroxide solutions for various concentrations and temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(3), 359-364.
- Gregory, M. R. (2009). Environmental implications of plastic debris in marine settings—entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2013-2025.
- Henderson, D. R. (2014). *Econic Catalyst Systems for Polycarbonates and Polyols from CO2*. Paper presented at the 3rd Conference on Carbon Dioxide as Feedstock for Chemistry and Polymers, Essen.
- Heyde, M., Kremer, M., Ebert, F., Fleischer, G., & Holley, W. (1999). *Recycling and recovery of plastics from packagings in domestic waste: LCA-type analysis of different strategies: ecomed*.
- Hinsen, W., & Baerns, M. (1983). Oxidative Coupling of Methane to C2-Hydrocarbons in the Presence of Different Catalysts. *Chemiker-Zeitung*, 107(7-8), 223-226.

- Hočevar, S., & Summers, W. (2008). *Hydrogen production*: Springer.
- Hoekman, S. K., Broch, A., Robbins, C., & Purcell, R. (2010). CO<sub>2</sub> recycling by reaction with renewably-generated hydrogen. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(1), 44-50.
- Hoffman, N. E., & Yang, S. F. (1980). Changes of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid content in ripening fruits in relation to their ethylene production rates. *J. Am. Soc. Hort. Sci*, 105(4), 492-495.
- Holladay, J. D., Hu, J., King, D. L., & Wang, Y. (2009). An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today*, 139(4), 244-260.
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115-2126.
- IEA. (2004). Energy statistics manual. Paris: IEA/OECD.
- IEA. (2013). Tehnology Roadmap. Energy and GHG reductions in the chemical industry via catalytic processes.
- Ikea. (2014). IKEA Gruppen börjar sälja solcellspaneler i Nederländerna och Schweiz [Press release]. Retrieved from <http://www.mynewsdesk.com/se/ikea/pressreleases/ikea-gruppen-boerjar-saelja-solcellspaneler-i-nederlaenderna-och-schweiz-1052322>
- IKEM. (2015). Seminarserie Industriell Biobaserad Ekonomi. Retrieved 06-01-15, from [http://www.ikem.se/vi-arbetar-med\\_1/blagul-kemi/seminarieserie](http://www.ikem.se/vi-arbetar-med_1/blagul-kemi/seminarieserie)
- IndustrieHauteTechnologie. (2014). Technical information/ Benefits of IHT's electrolyzers. Retrieved 31-10-14, from <http://www.iht.ch/technologie/electrolysis/industry/technical-information-benefits-electrolyzers.html>
- Institutet för Språk och Folkminnen. (2014). Nyordslistor. Retrieved 05-01-15, from <http://www.sprakochfolkminnen.se/sprak/nyord/nyordslistor.html>
- Intratec. (2014, 17-03-14). Propylene from Methanol (similar to Lurgi Methanol-to-Propylene). Retrieved 30-12-14, from <http://base.intratec.us/home/chemical-processes/propylene/propylene-from-methanol>
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014 Synthesis Report: Summary for Policymakers*: IPCC Secretariat.
- Ivy, J. (2004). Summary of electrolytic hydrogen production: milestone completion report: National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US).
- Jašo, S., Sadjadi, S., Godini, H., Simon, U., Arndt, S., Görke, O., . . . Schomäcker, R. (2012). Experimental investigation of fluidized-bed reactor performance for oxidative coupling of methane. *Journal of Natural Gas Chemistry*, 21(5), 534-543.
- Keller, G. E., & Bhasin, M. (1982). Synthesis of ethylene via oxidative coupling of methane: I. Determination of active catalysts. *Journal of Catalysis*, 73(1), 9-19.
- Kemiföretagen i Stenungsund. (2014). Hållbar Kemi 2030. Retrieved 15-12-14, from <http://kemiforetagenistenungsund.se/index.php?sida=kemiforetagen>
- Klar, M., Gunnarsson, D., Prevodnik, A., Hedfors, C., & Dahl, U. (2014). Allt du (inte) vill veta om plast: Naturskyddsföreningen.
- Kokoh, K., Mayousse, E., Napporn, T., Servat, K., Guillet, N., Soye, E., . . . Paul-Joseph, J. (2014). Efficient multi-metallic anode catalysts in a PEM water electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(5), 1924-1931.
- Kopyscinski, J., Schildhauer, T. J., & Biollaz, S. (2010). Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass—A technology review from 1950 to 2009. *Fuel*, 89(8), 1763-1783.

- LiquidLight. (2014). Retrieved 21-10-14, from <http://llchemical.com/>
- Magnusson, K., & Wahlberg, C. (2014). Mikroskopiska skräppartiklar i vatten från avloppsreningsverk (Vol. Nr B 2208): IVL Svenska Miljöinstitutet.
- Millet, P., Ngameni, R., Grigoriev, S., Mbemba, N., Brisset, F., Ranjbari, A., & Etievant, C. (2010). PEM water electrolyzers: from electrocatalysis to stack development. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(10), 5043-5052.
- Mogensen, M. (2014). *Production of Green Fuels using Solid Oxide Electrolysis Cells: Status and Perspective*. Paper presented at the 3rd Conference on Carbon Dioxide as Feedstock for Chemistry and Polymers, Essen.
- NewLight. (2014). AirCarbon. Retrieved 21-10-14, from <http://newlight.com/aircarbon/>
- Nikoleris, A. (2011). Solenergi och vätgas (ett demonstrationsprojekt).
- NOAA, N. O. A. A. (2014). Carbon Cycle Gases Mauna Loa, Hawaii, United States, Time Series. Retrieved 17-11-14 <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/iadv/graph.php?code=MLO&program=ccgg&type=ts>
- Norbeck, J. M., Heffel, J. W., Durbin, T. D., Tabbara, B., Bowden, J. M., & Montano, M. C. (1996). *Hydrogen fuel for surface transportation* (Vol. 160).
- Novomer. (2014). Technology. Retrieved 21-10-14, from <http://www.novomer.com/?action=CO2>
- Nyström, J. (2014). Mikroplast det dolda hotet i havet. *Forskning och Framteg*, 9, 34-40.
- Odian, G. (2004). *Principles of polymerization* (Vol. 3): Wiley-Interscience New York.
- Phytonix. (2014). The future of fuel. Retrieved 24-10-14, from <http://phytonix.com/>
- PlasticsEurope. (2008). The compelling facts about plastics, analysis of plastics production, demand and recovery for 2006 in Europe.
- PlasticsEurope. (2013). Plastics – the Facts 2013 An analysis of European latest plastics production, demand and waste data.
- Pollet, B. G. ((n/a)). Energy data
- Polynova, N. (2014). Plastmanual. Retrieved 27-10-14, from [http://polynova.se/Manualer/Plastmanual\\_lang\\_2.pdf](http://polynova.se/Manualer/Plastmanual_lang_2.pdf)
- Rajeshwar, K., McConnell, R. D., & Licht, S. (2008). *Solar hydrogen generation*: Springer.
- Ren, T., & Patel, M. K. (2009). Basic petrochemicals from natural gas, coal and biomass: energy use and CO<sub>2</sub> emissions. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(9), 513-528.
- Ren, T., Patel, M. K., & Blok, K. (2008). Steam cracking and methane to olefins: Energy use, CO<sub>2</sub> emissions and production costs. *Energy*, 33(5), 817-833.
- Salerno, D., Arellano-Garcia, H., & Wozny, G. (2011). Ethylene separation by feed-splitting from light gases. *Energy*, 36(7), 4518-4523.
- Saracco, G. (2014, 2-3 december 2014). *High Efficient Photo-electronic-chemical Reactors for Solar Fuels Production*. Paper presented at the 3rd Conference on Carbon Dioxide as Feedstock for Chemistry and Polymers, Essen.
- SBCEnergyInstitute. (2014). Hydrogen-based energy conversion solutions.
- Schomäcker, R. (2014). [OCM ].
- Shen, L., Haufe, J., & Patel, M. K. (2009). Product overview and market projection of emerging bio-based plastics PRO-BIP 2009. *Report for European Polysaccharide Network of Excellence (EPNOE) and European Bioplastics*, 243.
- Skyonic. (2014a). History. Retrieved 24-10-14, from <http://skyonic.com/history/>
- Skyonic. (2014b). Skyonic Opens World's First Commercial - Scale Carbon Capture and Utilization Facility [Press release]. Retrieved from <http://skyonic.com/wp->

- [content/uploads/2010/01/News-Release-Capitol-SkyMine-Grand-Opening-October-20-2014.pdf](#)
- Sohal, M. S., Virkar, A. V., Rashkeev, S. N., & Glazoff, M. V. (2010). Modeling Degradation in Solid Oxide Electrolysis Cells: Idaho National Laboratory Report INL/EXT-10-19691.
- Stünkel, S., Trivedi, H., Godini, H. R., Jašo, S., Holst, N., Arndt, S., . . . Schomäcker, R. (2012). Oxidative Coupling of Methane: Process Design, Development and Operation in a Mini - Plant Scale. *Chemie Ingenieur Technik*, 84(11), 1989-1996.
- Sunfire. (2014a). Power-to-Gas. Retrieved 27.10.14, from <http://www.sunfire.de/en/produkte/fuel/power-to-gas-methanisierung>
- Sunfire. (2014b). World premiere in Dresden - Sunfire presents power-to-liquids [Press release]. Retrieved from [http://www.sunfire.de/wp-content/uploads/Sunfire-PM-2014-05-Einweihung-PtL\\_final\\_EN.pdf](http://www.sunfire.de/wp-content/uploads/Sunfire-PM-2014-05-Einweihung-PtL_final_EN.pdf)
- Swift, T. K., Gilchrist Moore, M., Bhatia, S. . (2011). Mid-Year 2011 Situation & Outlook: American Chemistry Council.
- TetraPak. (2014). Tetra Pak launches industry's first package made entirely from plant based, renewable packaging materials [Press release]. Retrieved from <http://www.tetrapak.com/about-tetra-pak/press-room/news/first-package-made-from-plant-based-renewable-packaging-materials>
- TheEuropeanPlasticsIndustry. (2014). The Plastics Industry: A strategic partner for economic recovery and sustainable growth in Europe. Manifesto on the competitiveness of the plastics industry [Press release]
- TheWorldBank. (2014). CO2 emissions (kt). Retrieved 16-12-14 <http://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT/countries>
- Thomas, D. (2014). *Power-to-gas: Shifting Power with Gridscale Water Electrolysis*. Paper presented at the 3rd Conference on Carbon Dioxide as Feedstock for Chemistry and Polymers, Essen.
- Triogreen. (2014). Förnyelsebar råvara blir grön polyeten. Retrieved 20-10-14, from <http://www.triogreen.se/var-berattelse>
- TU-Berlin, U. (2014). Mini-plant for OCM process. Retrieved 21-10-14, from <http://www.unicat.tu-berlin.de/index.php?id=870>
- Turner, J., Sverdrup, G., Mann, M. K., Maness, P. C., Kroposki, B., Ghirardi, M., . . . Blake, D. (2008). Renewable hydrogen production. *International Journal of Energy Research*, 32(5), 379-407.
- UNEP, U. N. E. P. (2013). Global Chemical Outlook - Towards Sound Management of Chemicals.
- Ursua, A., Gandia, L. M., & Sanchis, P. (2012). Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. *Proceedings of the IEEE*, 100(2), 410-426.
- Waddington, S. (2014). *Carbon Dioxide-Based Polycarbonate Polyols for Polyurethane Systems; Commercial Applications of CO2 based Polyols*. Paper presented at the 3rd Conference on Carbon Dioxide as Feedstock for Chemistry and Polymers, Essen.
- Wang, C., Xu, L., & Wang, Q. (2003). Review of directly producing light olefins via CO hydrogenation. *Journal of Natural Gas Chemistry*, 12(1), 10-16.
- Zahid, M., Schefold, J., & Brisse, A. (2010). High-temperature water electrolysis using planar solid oxide fuel cell technology: a review. *Hydrogen and Fuel Cells, Fundamentals, Technologies and Applications, Wiley-VCH, Weinheim*, 227-242.
- ÅF. (2013). Power to gas - Internationell utblick och potential i Sverige.

## Appendix

Att använda växthusgaser som råvara i produktionsindustrin är en ny företeelse, men det finns redan ett antal aktörer på marknaden. I denna omvärldsbevakning presenteras först några aktörer som använder växthusgaser för tillverkning polymerer och sen ytterligare aktörer som tillverkar andra produkter.

### Exempel på aktörer som använder växthusgaser som råmaterial för polymerer

Detta kapitel är en sammanställning av de mest framstående och förekommande aktörerna som använder växthusgaser för att skapa kolväten och i slutändan plaster. Varje aktörs lösningar och skillnader presenteras separat. De fyra första aktörerna som presenteras deltog på den internationella CO<sub>2</sub>-konferensen om att använda koldioxid som råvara som besöktes i samband med studien.

#### **Liquid Light**

Det amerikanska företaget Liquid Light har som mål att förändra synen på koldioxid från oönskad växthusgasdrivande restprodukt till användbart råmaterial, framförallt för kemikalieproduktion. Deras första steg är en anläggning som använder koldioxid för att producera etandiol, även kallat glykol. Glykol har många användningsområden och en stor marknad, det används bland annat som fuktighetsbevarandemedel, kylarvätska, lösningsmedel eller kan polymeriseras till plast. Liquid Lights process är inte färdigutvecklad för industriellt bruk pekar de på den stora fördelen att koldioxid är en betydligt billigare råvara än de fossila råvaror som används idag för samma slutprodukter. Som vätekälla använder de vätgas, men de har inte angivit hur denna är framställd. På sikt har Liquid Light som mål att även tillverka andra mer komplexa kolväten. Företagets koncernchef talar stolt om att deras metoder minskar fossilberoendet samtidigt som det minskar koncentrationen av den mest förekommande växthusgasen (LiquidLight, 2014).

#### **Econic Technologies**

Det brittiska företaget Econic Technologies skapar polymerer av koldioxid och epoxider. Epoxider är kolväten som innehåller cykliska formationer av tre atomer varav två kolatomer och en syreatom. Dessa cykliska konstruktioner bidrar till en spänning som gör att de lättare reagerar än andra etrar, kolväten som innehåller syreatomer. I Econic Technologies process polymeriseras koldioxid och epoxider med hjälp av en katalysator till polymerer. Deras process kan producera antingen hög- eller lågdensitetspolykarbonater. Den täta högdensitetsplasten kan användas som förpackningsmaterial för mat då den är impermeabel och lågdensitetsplasten kan i huvudsak användas som råmaterial för andra mer komplexa plaststrukturer.

Den stora skillnaden från Econic Technologies processer jämfört med de andra aktörerna är att de använder epoxider som råvara, framförallt propenoxid och etenoxid, som härstammar från råolja. Deras process är därför beroende av råoljeraffinaderier och därför också en fortsatt oljeutvinning. En av Econic Technologies produkter kräver dessutom andra kolväten för att bilda sin slutprodukt, vilket också det skapar ett fossilberoende (EconicTechnologies, 2014).

## Novomer

Amerikanska Novomer använder en snarlik teknik som Eonic Technologies. Koldioxid och en epoxid tillsammans med en katalysator bildar polyetenkarbonat eller polypropenkarbonat. Slutprodukten beror både på vilken epoxid som används och hur katalysatorerna används. Novomers teknologi finns idag tillgänglig i demonstrationsskala som är under utveckling. De producerade plasterna har använts till att producera högdensitetsprodukter som flaskor och tunn plastfilm samt lågdensitetsplasten som används till skumtillverkning och som tillsatsämne i färg.

Produkt och produktionsmässigt är skillnaden mellan Novomer och Eonic Technologies liten, men rent marknadsföringsmässigt försöker Novomer inte dölja att de använder sig av råvaror från petrokemin. Företaget är snarare intresserat av att utveckla en avancerad och högpresterande katalysator än de faktiska växthusgasminskningar det kan leda till (Novomer, 2014).

## Eco<sup>2</sup>CO<sub>2</sub>

Det europeiska samarbetsprojektet ”*Eco-friendly biorefinery fine chemicals from CO<sub>2</sub> photocatalytic reduction*”, eller Eco<sup>2</sup>CO<sub>2</sub>, är ett forskning- och utvecklingsprojekt med partners från europeiska universitet och företag. Målet är att uppnå en fotoelektrokemisk omvandling av koldioxid till metanol. Den ickefossila metanolen ska sedan användas som råvara för tillverkning av finkemikalier i bioraffinaderier. Finkemikalier, till skillnad från baskemikalier, tillverkas i en mer begränsad volym och har ett högre pris, så som doftämnen, bindemedel och kolväten som exempelvis p-xylen. Projektets primära mål är att höja potentialen för bioraffinaderier och som sekundärt mål att minska jordens totala koldioxidutsläpp. Om projektet lyckas med sitt FoU-program hoppas man minska de globala koldioxidutsläppen med 50 Mton/ år (Eco2CO2, 2014).

## Newlight

Företaget Newlight har valt en annan ingång på det hela, istället för att använda koldioxid som kolkälla och sedan leta upp en vätekälla har de valt att direkt använda metan. Den starka växthusgasen metan består av både kol och väte och är i princip allt som behövs. Metan som fångas in från deponier och reningsverk, blandas med luft som bildar en vätska som sedan via biokatalysatorer bildar polymerer i form av plastpellets. Newlight hävdar att deras produkt, Aircarbon, är en växthusgasnegativ produkt som kan ersätta andra plaster på marknaden och som dessutom är billigare än oljebaserad plast. Skillnaden med Newlight produkt Aircarbon och andra plaster är att den inte består av samma kemiska uppbyggnad som dagens plast, vilket exempelvis gör den svårare integrera i den befintliga återvinningen.

Newlights egen information om produkten är tvetydig, vissa uppgifter hävdar att den är biologiskt nedbrytbar, alltså att den skulle brytas ner med tiden och återföra växthusgaserna till luften, vilket motsäger att plasten är kolnegativ som de hävdar på andra ställen. Annan produktrelaterad information hävdar att Newlight har egna återvinningsanläggningar som kommer att omprocessa plasten när användaren tröttnat på den (NewLight, 2014). Oavsett vad som är sant när det gäller nedbrytbarhet har Newlight lanserat ett mobiltelefonskal på den amerikanska marknaden. Lanseringen fick genomslag i pressen, och mobilskalet verkar ha sålts slut då den inte längre finns att köpa (Balch, 2014).

Exempel på aktörer som använder koldioxid som råvara till annat än polymerer



Att ändra synen på koldioxid från problematisk växthusgas till användbar kolkälla kan göras på andra sätt än att skapa polymerer och plaster, här följer några exempel på aktörer som gått en annan väg.

I Texas öppnades den 20 oktober år 2014 Skyonics anläggning Capitol SkyMine. Capitol SkyMine fångar in utsläppen från en cementfabrik och omvandlar den till produkter som är kommersiellt gångbara. Istället för att fånga in utsläppen och pumpa ner den för förvaring i jordskorpan, så kallad CCS, låter de gaserna genomgå separering och omvandling till eftertraktade produkter. Capitol SkyMine omvandlar koldioxid till natriumbikarbonat som industrin sedan kan sälja och på så sätt tjäna pengar på att minska sina utsläpp av växthusgaser. De två huvudsakliga produkterna är natriumbikarbonat som kan användas till djurfoder och saltsyra som kan säljas till metall, mat eller oljeindustrin. Utöver att koldioxid omvandlas till kommersiellt gångbara produkter, elimineras även  $SO_x$ ,  $NO_2$  och tungmetaller från cementfabrikens utsläpp (Skyonic, 2014b). En fördel med Skyonics lösning är att industrins befintliga teknik inte behöver anpassas, Capitol SkyMine är en plug-in lösning och kan anslutas direkt på redan befintlig utrustning. Tekniken är en end-of-pipe lösning, som producerar 143 000 ton natriumbikarbonat och 183 000 ton saltsyra årligen. De hävdar att deras anläggning är den första vinstdrivande mineraliseringsanläggningen av kol i världen, och visar på sin hemsida stolt upp hur detta är en fördelaktig lösning, oavsett om man tror på klimatförändringarna eller inte, ett grepp som kanske inte hade fungerat i den europeiska industrin (Skyonic, 2014a).

Det amerikanska företaget Calera har en pilotanläggning för koldioxidinfångning och användning. De omvandlar koldioxid, med hjälp av kalcium och hydroxidjoner, till kalciumkarbonat. Om de lyckas ta fram en anläggning i industriell skala kan kalciumkarbonat sedan säljas till byggindustrin och användas som fyllnadsmaterial i cement. Testanläggningen har varit igång i snart två år och producerar cirka 2 ton kalciumkarbonat varje dag, vilket motsvarar 730 ton om året (Calera, 2014).

Phytonix är en satsning på att tillverka biobränslen och förnyelsebara kemikalier från bakterier med koldioxid som råvara. Phytonix produktion sker via cyanobakterier, solljus, vatten och koldioxid i biokemiska reaktorer. Phytonix strävar efter att ta bort biomassabehovet vid biobränsleproduktion, för att på så sätt minska problemen med prioritering av landanvändning och varierande avkastning beroende på det förändrade klimatet. De cyanobakterier som Phytonix utvecklat kan tillverka N-butanol i en kolnegativ process, men ännu finns ingen tillverkning på industriellskala. N-butanol är ett kolväte som kan användas till både bränsle och kemikalier, exempelvis till biobaserade plaster (Phytonix, 2014).

Accelergy tillverkar syntetiska bränslen från naturgas, bestående i huvudsak av metan, via metanol, till syntetiska drivmedel som säljs till bränsle eller som råvara för kemikalietillverkning. Denna fossila process avger fossilt koldioxid som Accelergy fångar upp and använder genom deras egenutvecklade TerraSync. Koldioxid matas till en ljusbioreaktor där det odlar alger. När algerna växt klart bildar de ett bio-gödsel som distribueras på åkermark. Då algerna består av cyanobakterier, kommer koldioxidupptaget att fortsätta även efter att de lämnat anläggningen. Detta medför att, sett ur ett livscykelperspektiv, har det producerade fossila syntetiska drivmedlet ett lågt koldioxidutsläpp och kan därför klassas som ett klimatsmart bränsle (Accelergy, 2014).