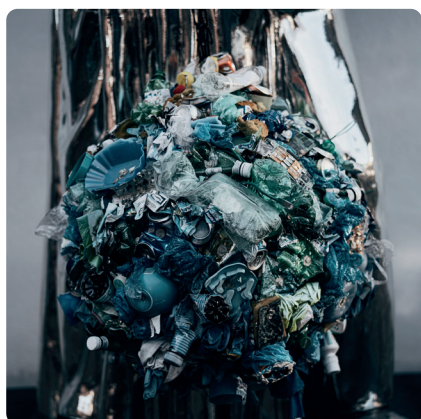


Kemisk återvinning av plast

Teknik, flöden och miljöaspekter

Henric Lassesson, Marie Gottfridsson, Maja Nellström,
Tomas Rydberg, Lars Josefsson och Cecilia Mattsson

RAPPORT 6990 • JUNI 2021



Kemisk återvinning av plast

Teknik, flöden och miljöaspekter

Beställningar

Ordertel: 08-505 933 40

E-post: natur@cm.se

Postadress: Arkitektkopia AB, Box 110 93, 161 11 Bromma

Internet: www.naturvardsverket.se/publikationer

Naturvårdsverket

Tel: 010-698 10 00

E-post: registrator@naturvardsverket.se

Postadress: Naturvårdsverket, 106 48 Stockholm

Internet: www.naturvardsverket.se

ISBN 978-91-620-6990-2

ISSN 0282-7298

© Naturvårdsverket 2021

Tryck: Arkitektkopia AB, Bromma 2021

Omslag: Unsplash

Förord

Sveriges långsiktiga klimatmål är att nettoutsläppen av växthusgaser ska vara noll senast år 2045. Plast står för över hälften av de fossila utsläppen från avfallsförbränning. För att nå de fastställda klimatmålen behöver den jungfruliga fossila plasten ersättas med material med lägre klimatpåverkan, och materialåtervinningen av plast behöver öka. Det finns flertalet hinder för omställningen som måste överkommas för att detta ska bli verklighet till 2045. Det handlar bland annat om efterfrågan på återvunnen och biobaserad plastråvara. Men också om tillgången på återvunnen råvara.

För att kunna skapa en tillgång på återvunnen råvara och även återvinna plaster som idag är svårt att återvinna är kemisk återvinning ett alternativ. Det är dock viktigt att det i så fall finns rätt förutsättningar för att en sådan anläggning ska ha en positiv effekt på mängden plast som kan återvinnas och att det är rätt typ av plast som skickas dit. Vilka plastflöden som har störst behov av kemisk återvinning och hur det kopplar till miljö- och climateffekter är också relevant.

För att öka förståelsen för vilka plasttyper som passar för olika metoder av kemisk återvinning, vilka olika metoder som är troligt att de blir kommersiellt gångbara och hur olika metoder eventuellt kommer konkurrera med varandra har denna rapport tagits fram. Rapporten belyser även vilken miljö- och climateffekt som olika metoder för kemisk återvinning kan erhålla, samt relationen till mekanisk återvinning.

Rapporten har tagits fram av Svenska MiljöEmissionsData (SMED) på uppdrag av Naturvårdsverket. Författarna ansvarar för rapportens innehåll. Rapporten har författats av Henric Lassesson, Marie Gottfridsson, Maja Nellström och Tomas Rydberg, IVL Svenska Miljöinstitutet, Lars Josefsson, Johanneberg Science Park, och Cecilia Mattsson, RISE Research Institutes of Sweden. Författarna riktar ett stort tack till alla dem som har bidragit med värdefull information och återkoppling på rapporten under projektets gång samt i samband med seminariet.

Stockholm 18 maj 2021

Anna-Karin Nyström
Enhetschef, Klimatmålsenheten

Innehåll

FÖRORD	3
ORDLISTA	6
1 SAMMANFATTNING	8
2 SUMMARY	19
3 BAKGRUND	29
4 KEMISK ÅTERVINNING – TEKNISKA PROCESSER	30
4.1 Studerade teknologier	30
4.2 Upplösning/utfällning	31
4.3 Depolymerisering	37
4.4 Solvolys	41
4.5 Pyrolys	45
4.6 Förgasning	54
4.7 CCU – Carbon capture and utilization	60
5 TILLSATSÄMNER I AVFALLSSTRÖMMAR OCH KEMISK ÅTERVINNING	65
6 INTRESSANTA FLÖDEN I DET SVENSKA AVFALLSSYSTEMET	69
6.1 Plast i restavfall	70
6.2 Utsorterade plastförpackningar	71
6.3 PET-flaskor	72
6.4 Fordon	72
6.5 Elektronikavfall	73
6.6 Bygg- och rivningsavfall	74
6.7 Blandat avfall från verksamheter (till förbränning)	75
6.8 Utsorterad plast från industrier	75
6.9 Grovavfall	75
6.10 Lantbruksplast	76
6.11 Plast i vätskekartong	76
6.12 Andra plastflöden	77
6.13 Sammanställning av polymertyper i plastavfallsflöden	77
7 KLIMAT- OCH ANNAN MILJÖPÅVERKAN	81
7.1 Mål och omfattning	81
7.2 Miljöpåverkanskategori klimat	81

7.3	Systemgränser	82
7.4	Avgränsningar och antaganden	83
7.5	Inventeringsanalys	83
7.6	Resultat – Miljöpåverkansbedömning	84
8	HINDER FÖR KEMISK ÅTERVINNING AV PLASTAVFALL	88
8.1	Sammanställning av de huvudsakliga hindren presenterade på intervjuerna	88
8.2	Styrmedel	94
9	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	97
9.1	Problem och hinder som kan lösas i plastflödet med kemisk återvinning	97
9.2	Flöden där kemisk återvinning skulle göra mest nytta	98
9.3	Hinder och möjligheter med införandet av kemisk återvinning	101
9.4	Potential för miljö- och klimatnytta	105
	REFERENSER	109
	BILAGA 1	116

Ordlista

ABS	Akrylnitrilbutadienstyren
BHET	Bis(hydroxyetylen)tereftalat
CCU	Carbon capture and utilization
CCS	Carbon capture and storage
CEAP	Circular economy action plan
CO ₂ -ekv	Koldioxidekvivalenter
DEHP	Diethylhexylftalat
EPR	Extended producer responsibility
EPS	Expanderad polystyrene
EU ETS	EU:s system för handel med utsläppsrätter (“Emissions Trading System”)
HBCD	Hexabromcyklododekan
HDPE	Högdensitets-polyeten
HIPS	Modifierad polystyren (“High Impact”)
HTL	Hydrotermisk förvätskning
LCA	Livscykelanalys
LDPE	Lågdensitets-polyeten
MMA	Meta-metylakrylat
MTO	Metanol till olefiner
NIR	Near infrared light
PA	Polyamid
PAH	Polycykliska aromatiska kolväten
PBDD	Polybromerade dibensodioxiner
PBDE	Polybromerade difenyletrar
PBDF	Polybromerade dibensofuraner
PC	Polykarbonat
PCR	Här Post-consumer recycled
PE	Polyeten
PET	Polyetentereftalat
PLA	Polymjölksyra
PMMA	Polymetametylakrylat (plexiglas)
PO	Polyolefiner, generellt
POM	Polyoxymetylen
PP	Polypropen

PU	Polyuretan, kan även förkortas PUR
PS	Polystyren
PtG	Power to gas
PtL	Power to liquid
PVC	Polyvinylklorid
RDF	Refuse-derived fuel
SVHC	Substance of very high concern
TACOIL	Thermal Anaerobic Conversion OIL
TBBPA	Tetrabrombisfenol A
TRL	Technology readiness level
UBA	Tyska naturvårdsverket
XPS	Extruderad polystyren
ÅVC	Återvinningscentral

1 Sammanfattning

Denna rapport är resultatet av ett projekt utfört av konsortiet SMED, tillsammans med underkonsulter, på uppdrag av Naturvårdsverket.

Syfte

Det övergripande syftet med uppdraget var att göra en analys av följande aspekter för kemisk återvinning:

- Vilka resurs-, miljö- och klimateffekter skulle en svensk anläggning kunna innebära, särskilt med avseende på aspekterna farliga ämnen, klimatpåverkan och resurseffektivitet, för olika kemiska återvinningstekniker, flöden och plastsorter?
- För vilka flöden och plastsorter kan kemisk återvinning vara aktuellt och för vilka plastsorter kan det göra mest nytta? Behövs reglering för att styra det?
- Vilka problem och hinder i plastflödet kan avhjälpas med kemisk återvinning? Vilka hinder och möjligheter finns med införandet av kemisk återvinning?

Metod

Projektet genomfördes huvudsakligen under perioden augusti till december 2020. De huvudsakliga momenten i genomförandet av projektet var att

- Gå igenom litteratur, både vetenskaplig litteratur, andra rapporter och utredningar samt även mer marknadsorienterad information, såsom websidor, för att kartlägga olika tekniker, pilotstudier och anläggningar, och extrahera relevant information.
- Identifiera och intervjua relevanta aktörer inom forskning, myndigheter och näringsliv med särskild kompetens och insyn i området och sammanställa samt bearbeta informationen från dessa.
- Hålla ett seminarium med brett urval av deltagare inklusive intervjuade personer för att få ytterligare synpunkter, inte minst inspel till analysen av hinder och möjligheter
- Bearbeta och sammanställa underlag och resultat samt författa och uppdatera rapport inklusive granskningar och återkopplingar från beställaren.

Tekniker för kemisk återvinning

Kemisk återvinning av plast är idag under stark utveckling och många anläggningar byggs eller är under projektering, främst på kontinenten. Kemisk återvinning innebär att plasterna genomgår en process eller följd av processer där polymerkedjorna bryts upp till mindre molekyler. Det finns många olika tekniker och varianter av kemisk återvinning, vilket delvis också beror på att det finns många olika plastsorter, och olika tekniker har utvecklats för att passa för olika

plasttyper. Vi har här gjort en indelning i sex kategorier av tekniker, där ordningen ungefär motsvarar graden av nedbrytning av polymererna, så att ju längre ner på listan, desto högre grad av nedbrytning.

De kategorier av tekniker som beskrivs i rapporten är

1. Upplösning/utfällning
2. Depolymerisering
3. Solvolys
4. Pyrolys
5. Förgasning
6. CCU – koldioxidinfångning och nyttiggörande
(Carbon Capture and Utilization)

Inom varje kategori finns oftast ett stort antal specifika teknikspår, och kategoriseringen är inte helt enkel. Det finns många olika begrepp som används inom området och terminologin är i dagsläget inte standardiserad.

Upplösning/utfällning innebär som benämningen antyder att polymeren löses upp i något lösningsmedium, med avsikt att sedan fällas ut igen efter avlägsnande av oönskade komponenter. Tanken är att separera polymerkedjor, men inte ha sönder dem, vilket dock inte helt undviks. Metoden kan kategoriseras som en fysikalisk-kemisk process.

Depolymerisering avser i denna studie en kategori av teknologier som innebär att polymerer genomgår en process där de specifikt delas sönder i sina byggstenar, monomerer, som därmed återskapas. Även processer som ospecifikt sönderdelar polymerer till mindre delar kan anses vara depolymerisering. Men enligt praxis avser depolymerisering just processer där återskapande av monomerer avses.

Solvolys avser i denna studie en process som utförs i ett vätskeformigt medium vid hög temperatur och högt tryck bryter ned polymerer till en oljeprodukt. Då mediet är vatten kallas det också hydrotermisk förvätskning eller HTL (hydrothermal liquefaction) och sker vid 200-400 grader och 50-250 bar.

Pyrolys innebär en process som sker i en syrefri eller syrefattig miljö, där plasterna upphettas och bryts sönder till mindre beståndsdelar, och där man vanligtvis eftersträvar en vätskeformig produkt. Därför används ibland även begreppet termisk förvätskning inom denna kategori.

Förgasning innebär att plasterna upphettas och bryts ned, med viss tillförsel av syre, till i huvudsak gasformiga ämnen, däribland kolmonoxid.

CCU - Koldioxidinfångning och -nyttiggörande innebär som namnet antyder att koldioxid fångas in och nyttiggörs. I kombination med förbränning av plast skulle CCU vara en form av kemisk plaståtervinning.

Egenskaperna hos de olika teknikkategorierna 1–6 har sammanfattats i tabell S1. De huvudsakliga för- och nackdelarna med olika tekniker har sammanställts i tabell S2.

Resurs-, miljö- och klimataspekter

Resurs- och Klimataspekter

Resurs- energi- och klimataspekter är nära sammankopplade då man studerar plaståtervinning. Kemisk återvinning som teknikfamilj intar ett resurs-, energi- och klimatomfattigt mellanläge mellan mekanisk återvinning och förbränning. Lokala förutsättningar i det enskilda fallet, såsom tillgång på klimatsnål processenergi, påverkar hur utfallet blir. Utsläppen från mekanisk återvinning är generellt mycket små. Det finns en viss miljöpåverkan, bland annat från produktionen av den elektricitet eller andra energibärare, som behövs för separation och tvättprocesser.

Utsläpp från kemisk återvinning för de olika teknikerna är sinsemellan i samma storleksordning, större än de från mekanisk återvinning, då kemisk återvinning kräver mer energi, men mindre än utsläppen från avfallsförbränning. Indirekta effekter, i detta fall främst mängd elektricitet och produktionssätt för denna, samt förhållanden i och kring avfallsförbränningsanläggningar (som är ett alternativt sätt att behandla plastavfall som inte kan återvinnas mekaniskt) kommer att ha stor inverkan på systemets prestanda. Om processen använder energi från koldioxidsnåla källor så kommer den ha en högre klimatnytta än om processen använder fossila energi- och råvarukällor. En del av det gasflödet skulle också kunna återvinnas som produkt, i en storskaligare, mer optimerad anläggning, och där energin istället tillförs från annan källa, som då kan vara en klimatsnål energikälla, till exempel grön el.

Farliga ämnen

Eftersom det handlar om kemiska processer kan man egentligen aldrig fullständigt garantera frihet från potentiellt riskabla ämnen. Det har varit ganska svårt att få helt klarlagd och likvärdig information för de olika teknikerna och för de olika varianterna av olika teknik, hur de hanterar tillsatser och eventuellt bildade farliga ämnen, delvis för att flertalet tekniker är ganska nya och inte helt utredda.

Tillsatsämnen kan delas in i fyra huvudgrupper i form av funktionella tillsatser, färgämnen, fyllmedel och förstärkningar. I dessa grupper finns bland annat flamskyddsmedel, mjukgörare, biocider, färgpigment, talk och glasfiber. Dessa ämnen kan bete sig olika under processer för kemisk återvinning beroende på kemisk struktur, mängd, processegenskaper samt om additiven är inbundna i polymeren. De olika teknikerna har olika karakteristik avseende detta. Genom att kontrollera och eventuellt förbehandla ingående plastavfallsström kan man styra den kemiska nedbrytningsprocessen och minska bildandet av farliga och oönskade ämnen.

För processer som sker under lägre temperatur på upp till 250°C, till exempel upplösning/utfällning och depolymerisering, kommer tillsatsämnets kemiska och termiska stabilitet bestämma hur ämnet påverkas. Detta medför att tillsatsämnena kan vara helt eller delvis nedbrutna, eller helt opåverkade. Därför behöver föroreningsprofil och reaktivitet undersökas för att optimera renhet på slutprodukten. Biprodukten i form av urlakade tillsatsämnen behöver också hanteras, exempelvis via destruktion eller återcirkulering. Om tillsatsämnet är klassat som farligt ämne enligt REACH kan detta ge problem i hantering och ökade krav på tillstånd för återvinningsaktörerna.

Under högre temperaturer på 300–1000°C, såsom i solvolys, pyrolys, förgasning och förbränning, kommer organiska molekyler påverkas via termisk eller kemisk nedbrytning. En viss bildning av aromatiska strukturer sker i dessa processer, och återfinns typiskt i fraktionerna tjära eller koks. Sådana ämnen kan därmed hittas i produkter från metoder för kemisk återvinning liksom vid förbränning. Tillsatser i form av färgämnen och flamskyddsmedel kan bilda nedbrytningsprodukter som kan störa processen eller bilda nya farliga ämnen. Förenklat kan man säga att allt som följer med in i dessa processer kan också till någon del komma att ingå i reaktionsprodukter. Så om syre, kväve, svavel, klor eller brom följer med in i processen, så kan nya ämnen bildas där dessa ingår, och detta behöver man beakta om man vill undvika sådana ämnen, antingen genom noggrann förseparering, eller lämpliga reningssteg. Variationerna i hur dessa ämnen hanteras är stora, beroende på specifik teknik och processbetingelser.

Användarna av produkter från kemisk återvinning vill inte ha med föroreningar av olika slag i sitt råvaruinflöde. Det talar för att man kommer vara tvungen att säkerställa att oönskade farliga ämnen i vid mening undviks i kemiskt återvunna produktflöden. Kemiska återvinningsanläggningar kommer generellt att lyda under liknande miljölagstiftning som kemiindustri. Det talar för att man kan via tillståndprocesser och miljörelaterad övervakning bevaka potentiella flöden av farliga ämnen. Rätt utförd kemisk återvinning kan därmed ge en ny möjlighet att hantera kontaminerade plastavfallsströmmar vilket skulle minska miljöpåverkan av dessa farliga ämnen.

Särskilt intressanta flöden

Olika tekniker passar bättre för olika plastsorter. I tabell S1 specificeras under respektive teknik vilka plastsorter som anses vara mest lämpade för den tekniken. Stora flöden har potential att ge stor nytta. Det har därför varit angeläget att belysa vilka plastsorter som finns i vilka flöden i samhället, och vilka mängder av plast det handlar om. Relevanta plastflöden i Sverige undersöktes med avseende på storlek, spridning och metod för avfallshantering. Utifrån den sammanställningen diskuterades flödenas potential för kemisk återvinning samt för vilka flöden som

kemisk återvinning skulle göra mest nytta. Flöden med lågt värde inom mekanisk återvinning har potential att vara attraktiva för kemisk återvinning.

Genom utökad plastavfallssortering av hushållsavfall (restavfall) och på befintliga återvinningsanläggningar (grovavfall) kan man få ut avfallsflöden där kemisk återvinning skulle kunna appliceras på plastströmmar som är mindre lämpliga för mekanisk återvinning. Fyra sådana strömmar förtjänar att lyftas fram här: polyeten och polypropen i blandat avfall, polystyren, PET-polyester och plast från fordon.

Polyeten och polypropen

Det finns en stor volympotential i att öka utsorteringen av polyeten (PE) och polypropen (PP) i olika avfallsströmmar, då dessa är de två vanligaste plastsorterna i samhället. Av de cirka 100 000 ton plastförpackningsavfall som samlas in separat idag är tre fjärdedelar PE och PP. Ungefär dubbelt så mycket PE och PP finns kvar i restavfallet, som idag går till förbränning.

SÖRAB har just tagit i drift en försorteringsanläggning i Brista där man avser sortera ut större delen av plasten som finns i restavfallet som kommer dit, och man räknar med att det rör sig om ungefär 20 000 ton per år. Ytterligare fyra anläggningar av den typen och storleken, placerade vid olika andra motsvarande avfallsstationer, skulle därmed ungefär kunna dubblera utsorterad mängd plastförpackningsavfall inklusive av PE och PP. Även om en stor del av den ökade utsorteringen skulle kunna återvinnas mekaniskt så vet vi också att en del av det som redan idag går till utsorteringsanläggningar inte går vidare till mekanisk återvinning men skulle kunna lämpa sig för kemisk återvinning.

Sannolikt kan en pyrolys-baserad teknik passa i det fallet, i synnerhet då denna teknik anses klara blandningar och laminat. Uppskattningsvis så är det omkring 400 000 ton PE och PP varje år som inte återvinns från de fem största inhemska flödena av plastavfall; blandat avfall från verksamheter, bygg- och rivningsavfall, restavfall, grovavfall och utsorterade förpackningar.

Polystyren

Polystyren (PS) finns i tre dominerande avfallsströmmar idag: restavfall (hushåll, PS), grovavfall (återvinningsanläggningar, PS/ABS) och elektronikavfall (PS/HIPS/flamskyddsmedel). De totala volymerna uppskattas till ca 24 000 ton. Det är oklart hur stor mängd som återvinns mekaniskt idag. För den delen som inte återvinns mekaniskt skulle det göra god nytta att etablera kemisk återvinning, antingen genom upplösning/utfällning, depolymerisering och lågtemperatur-solvolyt, eller en kombination av olika tekniker.

PET-Polyester

Polyester (specifikt polyetentereftalat, PET) återvinns mekaniskt idag från separat insamlade läskflaskor och liknande. Färgad plast är ej lika attraktiv för mekanisk återvinning på grund av de många olika färgtillsatserna. I det blandade

hushållsavfallets restfraktion och även i det utsorterade förpackningsavfallet finns en hel del PET, ofta i starka färger. I Sverige uppskattas det till att ungefär 70 000 ton PET-avfall finns tillgängligt, varav 45 000 ton finns i redan sorterat förpackningsavfall och flaskor och ytterligare 24 000 ton bedöms kunna sorteras ut från en utökad sortering av rest- och grovavfall. Här finns det en möjlighet att kemiskt återvinna en god del av dessa PET- och polyesterprodukter med upplösning/utfällning eller depolymerisering. Dessutom så kan denna typ av process utvecklas ihop med en liknande process för till exempel syntetisk PET (polyester) från textilt avfall.

Fordon

Polymerer av typ PP (ca 15 000 ton, varav ca 5000 ton fylld PP), PE (ca 8000 ton) och PA6/PA66 (ca 8000 ton) är de större volymerna från fordonsåtervinning. Exempel på andra polymerer och dess blandfraktioner är: ABS, PC+ABS, PC, PMMA, PVC och POM. Förekomsten av många olika plaster komplicerar återvinning, men i sektorn finns delvis redan logistik och demonteringsanläggningar på plats för att återvinna metaller. Denna skulle kunna utökas för att även återvinna polymerer från plastkomponenter.

Hinder och möjligheter

Idag är det mycket plastavfall som förbränns tillsammans med övrigt avfall i våra många avfallsförbränningsanläggningar. Av det som samlas in separat går också en betydande del som rejekt eller restfraktion till förbränning, eftersom endast den kvalitetsmässigt bästa delen av det insamlade går att avsätta på marknaden. Det finns en stor potential till att utöka sortering av plast för materialåtervinning.

Vad kemisk återvinning skulle kunna bidra med är inte minst att öka den totala efterfrågan på insamlad plastavfallsråvara. Idag finns ett moment 22 inom den mekaniska plaståtervinningen: att flödena är för små för att ge en tillräckligt stabil situation för många större potentiella användare. Därmed efterfrågas heller inte återvunnen råvara av dessa och inget tillräckligt incitament kommer från det hållet för återvinnare att öka insamlingen. En eller flera anläggningar för kemisk återvinning skulle åstadkomma en väsentligt ökad efterfrågan och därmed öka incitament för utsortering för återvinning.

Kemisk återvinning kan dessutom bidra med att få fram högvärdiga produkter av återvunnet material, vilket den mekaniska återvinningen inte klarar av där den återvunna produkten alltid är av samma eller sämre kvalitet än det ingående materialet. Mekanisk återvinning kan på ett effektivt sätt återvinna plastflöden av hög kvalitet till plastmaterial av något eller betydligt lägre kvalitet. Kemisk återvinning kan på ett mindre effektivt sätt återvinna plastflöden av lägre kvalitet till plastmaterial av högre kvalitet. De har på så sätt en bra potential att komplettera varandra.

De huvudsakliga hinder för kemisk återvinning, som uppdagats i denna studie, verkar grunda sig i att det är ett relativt nytt koncept för återvinning. Många lagar och andra styrmedel, men även infrastrukturen, är fortfarande baserade på att plast tillverkas från fossil råvara och ska sedan återvinnas via mekanisk återvinning så långt det är möjligt, eller annars förbrännas. De industriaktörer som har intervjuats under projektets gång pekar framförallt på att det saknas långsiktighet och tydlighet. De vill ha långsiktiga styrmedel som styr från fossila råvaror och från förbränning av plast mot återvunnen råvara och återvinning av plast inklusive kemisk återvinning. De vill också att alla styrmedel som påverkar dem ska vara tydliga i sin utformning, så att det inte uppstår några oklarheter om hur kemisk återvinning kommer in i avfallssystemet och att det är samma regler som i andra länder, särskilt inom EU. Om dessa önskemål uppfylls så finns det en möjlighet att få bort många identifierade hinder för kemisk återvinning.

Regleringar och styrmedel

Hård reglering för vilka specifika plaster som får eller inte får gå till kemisk återvinning anser vi inte vara en bra väg att gå. Däremot kan det vara lämpligt med olika styrmedel som hjälper marknaden att ”välja rätt”. Många styrmedel för att motverka utsläpp av klimatgaser kommer också att tydligt styra bort plast från förbränning vilket vi ser som ett av de mest effektiva sätten att generera mer tillgänglig plast för både mekanisk och kemisk återvinning. Det som i nuläget förefaller behövas är styrmedel för att öka utsortering och ökat krav på användning av återvunnen råvara. Fortsatt eller utökat stöd till grundläggande och tillämpad forskning kan också behövas och då i första hand till att utveckla återvinningsmöjligheter för kontaminerade strömmar och volymmässigt mindre strömmar, då det kommer vara svårt att bygga ekonomiskt möjliga processer av dessa avfallsströmmar.

Tabell S1: Sammanfattande tabell över teknisk karakteristik för kemisk upplösning, depolymerisering, solvolys (hydrotermisk förvätskning, HTL), pyrolys, förgasning och CCU för återvinning av plast. Teknikerna beskrivs med avseende på 1) hur noggranna krav man har på rena fraktioner (Sorteringsbehov), 2) vilka polymerer som är lämpliga för metoden, 3) om metoden är känslig för fukt (Behov av torkning), 4) hur tuffa reaktionsbetingelser som kännetecknar metoden (Reaktionstemperatur/tryck), 5) om metoden kräver något särskilt medium (Reaktionsmedia/atmosfär), 6) hur energieffektiv metoden är (Energibehov), 7) hur metoden hanterar kemiska tillsatser som finns i polymererna, 8) vilka produkter som tekniken ger, 9) om det finns väsentliga biprodukter, 10) vilket utbyte av användbara produkter man erhåller, och 11) vad huvudprodukterna är avsedda att användas till.

	Upplösning/ utfällning	Depoly- merisering	Solvolys (HTL)	Pyrolys	Förgasning	CCU kopplat till förbränning
Sorteringsbehov	Stort/medel	Stort/medel, Renare avfallsströmmar ger högre kvalitet och utbyte av monomerer	Medel	Medel	Lågt/inget	Inget
Lämpliga polymerer	LDPE, HDPE, PP, PA, PS, EPS, XPS, PET, PVC	PET, PA, PU, PC	LDPE, HDPE, PP, PS, PET, PVC	HDPE, LDPE, PP, PS	Restavfall	Restavfall
Behov av torkning	Ja (om ej vatten används)	Ja (om ej vatten används)	Nej	Ja	Ja	Nej
Reaktions- temperatur/ tryck	100–250 °C	200–250 °C	200–400 °C 5-25 MPa	400–600 °C	700–1300 °C	> 850 °C
Reaktionsmedia/ atmosfär	Lösningsmedel anpassat för specifika polymerer	T.ex. etylenglykol, alkoholer, vatten	Vatten, alkoholer	Inert, t ex Kvävgas	Kontrollerad atmosfär av luft, syre, vattenånga	Luft (förbränning) Vätgas (CCU)

Energibehov	Lågt/medel	Medel	Stort	Stort	Stort	Mycket stort
Kemiska tillsatser	Separeras bort	Separeras bort	Bryts ned	Bryts ned	Bryts ned	Bryts ned
Produkter	Polymer (en eller flera), som ska kunna användas direkt till plastprodukter	Monomer	Gas, olja, vattenfas (recirkuleras)	Gas, olja och vax	Syntesgas (dvs. CO:H ₂ 1:1 till 1:2) Vidare förädling till metanol och kolväten	Metan (CH ₄) eller metanol (CH ₃ OH)
Biprodukter	Tillsatsämnen/andra polymerer i ingående avfallsström	Tillsatsämnen/andra polymerer i ingående avfallsström	Koks, aromater i vattenfas	Koks	Koks, solids/inerts	Slagg/aska från förbränningen
Utbyte huvudprodukt	70–95 % (polymer)	70–95 % (monomer)	50–80 % (olja)	50–70 % (olja/vax)	50–70 % _{energi} (metanol)	Ej studerat
Användning av huvudprodukt	Återvunnen plastråvara	Monomer polymeriseras till polymer i befintliga processer (anpassade för fossil monomer)	Oljan används i befintliga raffinaderier och kemisk industri, för produktion av plast, kemikalier och bränslen	Oljan används i befintliga raffinaderier och kemisk industri, för produktion av plast, kemikalier och bränslen	Metanol och kolväten används i kemisk industri, för produktion av plast, kemikalier och bränslen	Metanol och kolväten används i kemisk industri, för produktion av plast, kemikalier och bränslen

Tabell S2: Sammanfattande tabell över de viktigaste fördelarna och nackdelarna med kemisk upplösning, depolymerisering, solvolys, pyrolys, förgasning och CCU för återvinning av plast

	Fördelar	Nackdelar
Gemensamt för alla tekniker	<p>Kan återvinna det plastavfall som inte kan återvinnas mekaniskt. Föroreningar, tillsatser, färger och blandningar av material kan hanteras, varierar mellan tekniker, men alla hanterar det bättre än mekanisk återvinning.</p> <p>En stor del av det plastavfall som idag ger en lågvärdig mekaniskt återvunnen produkt kan återvinnas kemiskt. De återvunna plastmaterialen har likvärdig eller samma kvalitet som jungfruliga material, om det återvinns tillbaka till plast. "Closed-loop recycling" är möjlig.</p>	<p>Kan inte idag konkurrera prismässigt med jungfrulig fossil råvara, med dagens styrmedel.</p> <p>Kräver mer energi och en mer komplicerad (dyrare) process än mekanisk återvinning.</p> <p>Ingen teknik för kemisk återvinning är optimal som en ensam teknik för att återvinna all plast. Det bästa är om flera tekniker kombineras med varandra och ihop med mekanisk återvinning.</p>
Kemisk upplösning	<p>Behöver endast klassisk kemisk processteknisk utrustning för upplösning, separation och reningssteg.</p> <p>Kan hantera plastkompositer med fiberförstärkningsmaterial.</p>	<p>Behöver försorterade avfallsströmmar med dominans av en eller två polymerer med liknande föroreningsprofil.</p> <p>Energi- och kemikaliekrävande utfällning</p> <p>Höga processtemperaturer kan bryta ned polymeren, vilket ger sämre egenskaper. Även additiven kan då påverkas (negativt eller positivt).</p> <p>Restfraktioner av additiver måste hanteras för destruktion.</p>
Depolymerisering	<p>Återvunnen monomer kan polymeriseras i befintliga industrialiserade processer för produktion av polymer. Inga nya polymeriseringsprocesser behöver utvecklas.</p>	<p>Behöver försorterade avfallsströmmar med dominans av en eller två polymerer med liknande föroreningsprofil.</p> <p>Förprocess för avfärgning och tillsatsämnen kan behövas (upplösning/filtrering). Diffusion av föroreningar/tillsatser ur polymeren kan kräva stora volymer av lösningsmedel som måste recirkuleras.</p> <p>Rening och recirkulering av lösningsmedel krävs.</p> <p>Restfraktioner av additiver måste hanteras för destruktion.</p> <p>Viktigt att kunna återanvända katalysatorn eller ha en billig katalysator.</p>

Solvolys	<p>Har potential att användas för att rena upp komplexa kontaminerade avfallsströmmar från halogener och metaller som ett försteg innan vidare kemisk återvinning.</p> <p>Vatten används som lösningsmedel, detta är ett miljövänligt lösningsmedel som kan återcirkuleras i processen.</p> <p>Ingående plastråvara behöver ej torkas eftersom processen är vattenbaserad.</p> <p>Solvolys ger en stabilare oljeprodukt än pyrolys då reaktiva föreningar separeras bort i vattenfasen.</p>	<p>Hög temperatur/tryck ger hög energiåtgång och ställer höga krav på processutrustningen.</p> <p>Organiska lösningsmedel (t.ex. etanol och fenol) kan behövas som additiv för att stoppa bildning av biprodukter som koks.</p> <p>Komplex sammansättning av oljan, som måste gå igenom ytterligare steg för att isolera användbara molekyler.</p> <p>Betydande förluster om plasten ska återvinnas tillbaka till plast igen.</p>
Pyrolys	<p>Den höga temperaturen kan användas för att bryta ner organiska riskämnena.</p> <p>Tekniken har hög ”technology readiness level” (TRL).</p>	<p>Energikrävande process.</p> <p>Komplex sammansättning av oljan, som måste gå igenom ytterligare steg för att isolera användbara molekyler.</p> <p>Betydande förluster om plasten ska återvinnas tillbaka till plast igen.</p> <p>Kräver en förutsägbar sammansättning på plastavfallet.</p> <p>Osäkert hur hög inblandningsgrad som går att ha av pyrolysolja i en process som är anpassad för fossil nafta.</p>
Förgasning	<p>Kan hantera nästan vilket brännbart avfall som helst, inklusive en stor del av de sorteringsrester och annat restmaterial som kommer från flera av de andra teknikerna för kemisk och mekanisk återvinning.</p> <p>Den höga temperaturen kan användas för att bryta ner organiska riskämnena.</p> <p>Oorganiska ämnen (annat än C, H, O) kan renas bort från syntesgasen, eller som slagg.</p>	<p>Energikrävande process, mer energikrävande än pyrolys.</p> <p>Betydande förluster av material om plasten ska återvinnas till plast igen.</p> <p>Stor investeringskostnad kräver en större anläggning för att få ihop ekonomin.</p> <p>Något lägre ”technology readiness level” (TRL) än pyrolys.</p>
CCU	<p>Kan kombineras med andra processer som släpper ut koldioxid.</p> <p>Kan användas för att skapa flexibilitet på användarsidan i elnätet.</p>	<p>Energikrävande process, mer energikrävande än förgasning.</p> <p>Tekniken är inte lämplig för återvinning, men kan kopplas ihop med andra processer för att öka mängden kolväten som recirkuleras.</p>

2 Summary

Aim

The overall purpose of the assignment was to make an analysis of the following aspects of chemical recycling:

- What could be the resource, environmental and climate impacts of a plant in Sweden for chemical recycling of plastics. Aspects of particular interest for different chemical recycling techniques, flows and plastics were those of hazardous substances, climate impact and resource efficiency
- For which flows and types of plastic can chemical recycling be relevant and for which types of plastic can it be the most beneficial? Is regulation needed to control it?
- What problems and obstacles in the flow of plastic can be overcome by use of with chemical recycling? What are the obstacles and opportunities with the introduction of chemical recycling?

Method

The project was carried out during August-December 2020. The following activities were carried out in the project

- Survey of literature, scientific as well as popular sources, as well as web-pages, for reviewing different technologies, pilot studies and plants and extracting relevant information
- Identification and interview of different stakeholders with key competence within authorities, academia and industry, to compile relevant information
- A workshop with a broad representation from competence and stakeholders for feedback and additional viewpoints as well as input to the survey of obstacles and opportunities
- Compilation of all information and authoring of the report

Technology survey

There are many initiatives on chemical recycling under way. A few plants are in operation, albeit in small scale, several plants are in the construction and building phase, and others are in a design and planning phase. Chemical recycling of plastic waste refers to technologies in that break the plastic by different means, for example heat or solvents, to smaller molecules or to the constituent atoms as building block for new plastics. A multitude of technologies and variants are available partly due to the fact that there is a multitude of plastics, and different technologies are adapted to different plastics. In this study, we have described six different categories of technologies, the order of which roughly correspond to the degree of breakdown of the polymers, so that the further down the list, the more breakdown of polymer structures:

1. Dissolution/precipitation
2. Depolymerization
3. Solvolysis
4. Pyrolysis
5. Gasification
6. CCU – Carbon Capture and Utilization

Dissolution/precipitation is a physico-chemical process, in which polymers are dissolved in a solvent, which is intended to separate the polymers from impurities and then in a consecutive process step precipitate the polymer in its pure form.

Depolymerisation means that the polymer is decomposed into smaller parts, in this report specifically into its building blocks, monomers.

Solvolysis is a high pressure and high temperature process carried out in a solvent medium, which can be water, in which case the process is called HTL - hydrothermal liquefaction.

Pyrolysis is a process at elevated temperature without added oxygen, and it typically generates a liquid product, known as pyrolysis oil.

Gasification is carried out under combustion-like conditions, but with controlled and limited amount of oxygen, typically leading to a desired main product flow of carbon monoxide and hydrogen (synthesis gas).

CCU – Carbon capture and storage is not a chemical recycling process in itself but can be seen as a means to recover carbon as a source for subsequent use in new polymers.

Properties and characteristics of the different technologies are summarized in Table S1. Main advantages and disadvantages for different technologies are summarized in Table S2.

Resource, environment and climate aspects

Resource and climate aspects

There is a close link between resources, energy and climate impacts when studying chemical recycling. The material itself is energy rich. Plastic waste is often utilized for process energy or power and heat production. Therefore, local and specific energy system conditions play a major role in determining the climate performance of chemical recycling plants. As a general observation, chemical recycling turns out to have an intermediate climate performance position between mechanical recycling and incineration, when drawing such a conclusion from the mass yield and energy requirement for these processes.

Substances of concern

Various additives are present in plastics and can be divided into four main groups: functional additives, colorants, fillers and reinforcements. These groups include flame retardants, plasticizers, biocides, color pigments, talc and glass fiber. When subjecting these substances to a chemical recycling process, they may react in different ways and sometimes impede the process, or else form more cumbersome decomposition products, or not be affected at all. It has been difficult in the project to find really good information about this issue, but some general observations can be made.

In lower temperature processes, (dissolution/precipitation, depolymerization) the process serves as a sort of separation process for the additives. But of course, the residual fraction containing the additive needs to be taken care of. In ideal cases, the additive can also be recovered as-is, and used again, or if desired, deviated to destruction.

In higher temperature processes (solvolysis, pyrolysis, gasification, incineration) any substance entering the process can in theory also end up in a reaction product coming out of the process. Organic molecules will normally be decomposed thermally or chemically. Additives can under unfortunate conditions form more hazardous compounds, or they can influence the process negatively.

Prospective users of raw material from chemical recycling do not want contaminants in their raw material supply. Therefore it can be anticipated that there will be requirements on operators of chemical recycling to safeguard the quality of their output. The chemical recycling plants will have to operate under license to operate similar to that of other chemical plants. In this way, correctly operated chemical recycling may contribute to a detoxification of circular material flows.

Suitable flows for chemical recycling

Different technologies are better suited for different types of plastic. Table S1 specifies which types of plastic that are considered to be most suitable for each technology. The larger the flows, the greater the potential to achieve benefits. Therefore, it has been important to shed light on which types of plastic are present in which flows in society, and what quantities of plastics are involved. Relevant plastic flows in Sweden were investigated with regards to volume, where they occur, and the method for waste management. Flows with low value in mechanical recycling have the potential to be attractive for chemical recycling. Based on that analysis, the plastic waste flows that are most promising as useful as source for chemical recycling has been selected.

Through extended plastic waste sorting of household waste (residual waste) and at existing recycling facilities (bulky waste), waste streams can be extracted where chemical recycling could be applied to plastic streams that are less suitable for

mechanical recycling. Four such streams are highlighted here: polyethylene and polypropylene, polystyrene, PET-polyester and plastic from vehicles.

Polyethylene and polypropylene

The potential to increase the sorting of polyethylene (PE) and polypropylene (PP) from different waste streams is large, as these are the two most common types of plastic in society. In total, it is estimated that around 400,000 tonnes of PE and PP are not recovered each year from the five largest domestic flows of plastic waste; mixed waste from operations, construction and demolition waste, residual waste, bulky waste and sorted packaging. Specifically, of the approximately 100,000 tonnes of plastic packaging waste collected separately today, three quarters are PE and PP. Approximately twice as much PE and PP remains in the residual waste, which today goes to incineration.

SÖRAB has just put into operation a pre-sorting plant in Brista for residual waste arriving at their plant. There they intend to sort out most of the approximately 20,000 tonnes per year of plastic in the residual waste that arrives there. Another four plants of this type and size, located at other corresponding waste stations, could thus roughly double the recovered amount of plastic packaging waste compared to today, including PE and PP. While most of this increased pre-sorted plastic could and should be recycled mechanically, it also increases the availability of material suitable for chemical recycling. Most likely, a pyrolysis-based technique may be suitable in that case, especially when this technique is able to process laminates.

Polystyrene

Polystyrene (PS) is found in three dominant waste streams today: residual waste (household, PS), bulky waste (recycling facilities, PS / ABS) and electronic waste (PS / HIPS / flame retardants). The total volumes are estimated at about 24,000 tonnes. It is unclear how much is mechanically recycled in the current situation. For the part that is not mechanically recycled, it would be useful to establish chemical recycling, either by dissolution / precipitation, depolymerization and low temperature solvolysis, or a combination of different techniques.

PET-Polyester

Polyester (specifically polyethylene terephthalate, PET) is mechanically recycled today from separately collected soft drink bottles and the like. Colored plastic is not as attractive for mechanical recycling due to the many different color additives. In the residual fraction of the mixed household waste and also in the sorted packaging waste a lot of PET is to be found. It is estimated that approximately 70,000 tonnes of PET waste is available in Sweden, of which 45,000 tonnes are in already sorted packaging waste and bottles. A further estimated 24,000 tonnes could roughly be recovered through an additional sorting of residual and bulky waste. This indicates an identified opportunity to chemically recycle a fraction of PET and polyester products with dissolution / precipitation or depolymerization.

As an added value, such a plant might possibly also process PET from textile waste.

Vehicle plastic waste

The larger volumes of plastic waste from vehicle recycling consist of polymers of type PP (approx. 15,000 tonnes, of which approx. 5000 tonnes filled PP), PE (approx. 8000 tonnes) and PA6 / PA66 (approx. 8000 tonnes). Examples of other polymers and their mixed fractions are: ABS, PC + ABS, PC, PMMA, PVC and POM. The presence of many different plastics complicates recycling, but on the other hand, there are already collection, dismantling and scrapping facilities in place for recycling metals and other valuables from vehicles, which may favor also the extension of these operations to also recover polymers from plastic components.

Obstacles and opportunities

A lot of plastic waste is currently incinerated co-mingled with other residual waste including household waste, in municipal waste incinerators. In addition, a significant share of the separately collected plastic packaging waste is incinerated. There isn't a high demand in the market for mechanical recycling because of the quality being too low. Chemical recycling could definitely create opportunities to recycle more of that material.

Today, there is a catch 22 in mechanical plastic recycling that the flows are too small to provide a sufficiently stable situation for many major potential users. As a result, recycled raw materials are not in demand from these plastic flows and no sufficient incentive will come from the user side in order for recyclers to increase the collection. Chemical recycling facilities would increase the total demand for collected plastic waste raw material. One or more facilities for chemical recycling would create a significantly increased demand and thereby increase incentives for sorting for recycling. Hence, an increase of demand from a chemical recycling plant may need a concurrent increase in sorting facilities.

Chemical recycling can also help to produce high-quality products from recycled materials, which mechanical recycling cannot do where the recycled product is always of the same or a lower quality than the constituent material. Mechanical recycling can efficiently recycle high-quality plastic flows into plastic materials of slightly or significantly lower quality. Chemical recycling can recycle lower quality plastic flows into higher quality plastic materials in a less efficient way. In this way, they have a good potential to complement each other.

The main obstacles to chemical recycling identified in this study seem to stem from the fact that it is a relatively new concept for recycling. Many laws and other instruments, but also the infrastructure, are still based on plastic being made from fossil raw materials and then having to be recycled via mechanical recycling as far

as possible, or otherwise incinerated. The industrial actors who have been interviewed during the project mainly point out that they see a lack of long-term perspective and clarity. They want long-term policy instruments that steer away from fossil raw materials and away from the incineration of plastics, towards recycled raw materials and towards recycling of plastics, including chemical recycling. They also want all instruments that affect them to be clear in their design, so that there is no ambiguity about how chemical recycling will be a part of the waste system and that the rules are the same as in other countries, especially within the EU. If these wishes are met, there is an opportunity to remove many identified obstacles to chemical recycling.

Policy instruments

We do not consider strict regulation to be a preferred way forward, regarding which specific plastics may or may not go to chemical recycling. However, different policy instruments that pushes the market in the right direction might be appropriate. Many policy instruments to counteract greenhouse gas emissions will also clearly steer plastic away from incineration. We see this as one of the most effective ways to generate more plastic available for both mechanical and chemical recycling. What currently seems to be urgently needed are policy instruments to increase sorting, as well as instruments that promote demand of recycled raw materials, which for example could be implemented in circular public procurement. Continued or increased support to research, basic as well as applied, is also needed. Possibly a specific field of research would be to support development of recycling opportunities for contaminated streams and smaller streams in terms of volume, as it will be difficult to build economically possible processes based on these waste streams.

Table S1: Summary table of technical characteristics for chemical dissolution, depolymerization, solvolysis (hydrothermal liquefaction, HTL), pyrolysis, gasification and CCU for plastic recycling. The techniques are described with regard to 1) how strict the requirements are for pure fractions (Sorting requirements), 2) which polymers are suitable for the method, 3) if the method is sensitive to moisture (Need for drying), 4) how severe the reaction conditions typically are for the method (Reaction temperature/pressure), 5) if the method requires a special medium (Reaction media/atmosphere), 6) how energy efficient the method is (Energy requirements), 7) how the method handles chemical additives present in the polymers, 8) which products the technology provides, 9) if there are essential by-products, 10) what yield of useful products is obtained, and 11) what the main products are intended to be used for.

	Dissolution/ precipitation	Depolymerization	Solvolysis (HTL)	Pyrolysis	Gasification	CCU coupled to combustion
Sorting requirements	Large/medium	Large/medium, Cleaner waste streams provide higher quality and yield of monomers	Medium	Medium	Low/none	None
Suitable polymers	LDPE, HDPE, PP, PA, PS, EPS, XPS, PET, PVC	PET, PA, PU, PC	LDPE, HDPE, PP, PS, PET, PVC	HDPE, LDPE, PP, PS	Residual waste	Residual waste
Need for drying	Yes (unless water is used)	Yes (unless water is used)	No	Yes	Yes	No
Reaction temperature/pressure	100–250 °C	200–250 °C	200–400 °C 5-25 MPa	400–600 °C	700–1300 °C	> 850 °C
Reaction media/atmosphere	Solvent adapted for specific polymers	For example, ethylene glycol, alcohols, water	Water, alcohols	Inert, e.g. nitrogen	Controlled atmosphere of air, oxygen, water vapor	Air (combustion) Hydrogen (CCU)

Energy requirements	Low/medium	Medium	Large	Large	Large	Very large
Chemical additives	Separated	Separated	Decomposed	Decomposed	Decomposed	Decomposed
Products	Polymer (one or more), which can be used directly for plastic products	Monomer	Gas, oil, aqueous phase (recycled)	Gas, oil and wax	Synthesis gas (i.e. CO:H ₂ 1:1 to 1:2) Further processing to methanol and hydrocarbons	Methane (CH ₄) or methanol (CH ₃ OH)
By-products	Additives and other polymers in the incoming waste stream	Additives and other polymers in the incoming waste stream	Coke, aromatics in aqueous phase	Coke	Coke, solids/inerts	Slag/ash from the incineration
Yield of main product	70–95 % (polymer)	70–95 % (monomer)	50–80 % (oil)	50–70 % (oil/wax)	50–70 % _{energy} (methanol)	Not studied
Use for main product	Recycled plastic raw material	Monomer is polymerized to polymer in existing processes (adapted for fossil monomer)	The oil is used in existing refineries and the chemical industry, to produce plastics, chemicals and fuels	The oil is used in existing refineries and the chemical industry, to produce plastics, chemicals and fuels	Methanol and hydrocarbons are used in the chemical industry, to produce plastics, chemicals and fuels	Methanol and hydrocarbons are used in the chemical industry, to produce plastics, chemicals and fuels

Table S2: Summarizing table of the main advantages and disadvantages of chemical dissolution, depolymerization, solvolysis, pyrolysis, gasification and CCU for plastic recycling.

	Advantages	Disadvantages
Common to all techniques	<p>Can recycle the plastic waste that is not suited for mechanical recycling. Contaminants, additives, colors and mixtures of materials can be handled. It varies between different techniques how well this can be handled, but all of them handles it better than mechanical recycling.</p> <p>A large part of the plastic waste that today gives a low-value mechanically recycled product can be recycled chemically.</p> <p>The recycled plastic materials have a similar or the same quality as virgin materials, if it is recycled back into plastic.</p> <p>"Closed-loop recycling" is possible.</p>	<p>Cannot currently compete on price with virgin fossil resources, with current policy instruments.</p> <p>Requires more energy and a more complicated (more expensive) process than mechanical recycling.</p> <p>No technology for chemical recycling is optimal as a single technology for recycling all plastic. It is best if several technologies are combined with each other and together with mechanical recycling.</p>
Chemical dissolution	<p>Need only classical chemical process equipment for the dissolution, separation and purification steps.</p> <p>Can handle plastic composites with fiber reinforcement material.</p>	<p>Needs pre-sorted waste streams with dominance of one or two polymers with similar contamination profile.</p> <p>High energy and/or chemicals demand for precipitation. .</p> <p>High process temperatures can degrade the polymer, resulting in lower qualities. The additives can then also be affected (negative or positive). Residuals e.g. additive containing fraction must be handled for destruction.</p>
Depolymerization	<p>The recycled monomer can be polymerized in existing industrialized polymer production processes. No new polymerization processes need to be developed.</p>	<p>Need pre-sorted waste streams with dominance of one or two polymers with similar contamination profile.</p> <p>Pre-process for decolorization and additives may be needed (dissolution/filtration). Diffusion of impurities / additives from the polymer may require large volumes of solvents that must be recycled and purified, often with high energy cost.</p> <p>Residual fractions of additives must be handled for destruction.</p> <p>It is important to be able to reuse the catalyst or have a low-cost catalyst.</p>

<p>Solvolytic</p>	<p>Has the potential to be used to purify complex contaminated waste streams from halogens and metals as a pre-step to further chemical recovery.</p> <p>Water is used as a solvent, which is an environmentally friendly solvent that can be recycled in the process.</p> <p>Incoming plastic raw material does not need to be dried because the process is water-based.</p> <p>Solvolytic gives a more stable oil product than pyrolysis when reactive compounds are separated into the aqueous phase.</p>	<p>High temperature/pressure gives high energy consumption and places high demands on the process equipment.</p> <p>Organic solvents (e.g. ethanol and phenol) may be needed as additives to stop the formation of by-products such as coke.</p> <p>Complex composition of the oil, which must go through additional steps to isolate useful molecules</p> <p>Significant losses if the plastic is to be recycled back to plastic again</p>
<p>Pyrolytic</p>	<p>The high temperature can be used to decompose organic hazardous substances.</p> <p>The technology has a high technology readiness level (TRL).</p>	<p>Energy-intensive process.</p> <p>Complex composition of the oil, which must go through additional steps to isolate useful molecules.</p> <p>Significant losses if the plastic is to be recycled back to plastic again.</p> <p>Requires a predictable composition of the plastic waste.</p> <p>It is uncertain how high a degree of admixture can be used of pyrolytic oil in a process that is adapted for fossil naphtha.</p>
<p>Gasification</p>	<p>Can handle almost any combustible waste, including a large part of the sorting residues and other residual material that comes from several of the other chemical and mechanical recycling techniques.</p> <p>The high temperature can be used to break down organic hazardous substances.</p> <p>Inorganic substances (other than C, H, O) can be purified from the synthesis gas, or as slag.</p>	<p>Energy-intensive process, more energy-intensive than pyrolytic.</p> <p>Significant losses of material if the plastic is to be recycled into plastic again.</p> <p>Large investment costs require a larger facility to bring the economy together.</p> <p>Slightly lower technology readiness level (TRL) than pyrolytic.</p>
<p>CCU</p>	<p>Can be combined with other processes that emit carbon dioxide.</p> <p>Can be used to create flexibility on the user side of the electricity grid.</p>	<p>Energy-intensive process, more energy-intensive than gasification. Not developed for recycling but can be linked to other processes to increase the amount of recycled carbon.</p>

3 Bakgrund

Sveriges långsiktiga klimatmål är att nettoutsläppen ska vara noll senast år 2045. En av de viktiga källorna till fossila växthusgasutsläpp är förbränning av fossilbaserad plast. Fossil plast i avfallsförbränning står i dagsläget för majoriteten av de fossila utsläppen från el- och fjärrvärmesektorn i Sverige. För att minska utsläpp av växthusgaser från fossilbaserad plast finns det flera omställningsåtgärder som behöver undersökas, såsom användning av mer biobaserad plast istället för fossil plast och att öka materialåtervinning av plast dels genom mekanisk återvinning och dels genom kemisk återvinning. Det finns flertalet utmaningar för dessa nödvändiga omställningar. Det handlar både om tillgången på återvunnen råvara och om efterfrågan på återvunnen och biobaserad plastråvara.

För att kunna skapa en tillgång på återvunnen råvara, och även återvinna plaster som idag är svåra att återvinna, är kemisk återvinning ett alternativ. Det är dock viktigt att det i så fall finns rätt förutsättningar för att sådana anläggningar ska ha en positiv effekt på mängden plast som kan återvinnas, till exempel att tekniken är anpassad för de plastflöden som finns och att det är rätt typ av plast som skickas dit. Vilka plastflöden som är lämpliga för kemisk återvinning, och den kemiska återvinningens miljö- och climateffekter, är också relevant.

Tidigare studier har visat att det finns en potential för kemisk återvinning att fungera som ett komplement till dagens avfallshanteringssystem och därmed minska förbränningen av de plastflöden som inte kan hanteras av mekanisk materialåtervinning¹. Men det behövs en större förståelse för vilka plastflöden och plasttyper som passar för olika metoder av kemisk återvinning och vilka olika metoder som är eller kan bli kommersiellt gångbara. Vilken miljö- och climateffekt som kan fås med olika metoder för kemisk återvinning behöver belysas, samt i vilken mån kemisk återvinning kompletterar eller konkurrerar med mekanisk återvinning.

Kemisk återvinning av plast är idag under stark utveckling och många anläggningar byggs eller är under projektering, främst på kontinenten. Även i Sverige undersöks, inte minst av aktörer inom Västsvenska Kemi- och Materialklustret, möjligheten att bygga det man kallar ett plastreturraffinaderi.

Den här studien har som syfte att öka kunskapen kring vad kemisk återvinning är, vilken potential det har specifikt i det svenska sammanhanget utifrån förutsättningar avseende tillgängliga eller potentiellt tillgängliga flöden, inte minst ifrån avfallssektorn, och vilken miljö- och klimatpåverkan kemisk återvinning ger upphov till eller sparar.

¹ Lätt et al. 2019

4 Kemisk återvinning – tekniska processer

4.1 Studerade teknologier

Vi har i rapporten valt att inkludera totalt sex olika teknologier i vår översikt av kemisk återvinning av plaster. Följande lista omfattar de teknologier som beskrivs i den här studien. Listan är organiserad i en ordning på så sätt, att ju längre ner på listan man kommer, i desto större utsträckning bryts polymermolekylerna i plasten ner. Det är främst de fyra mittersta (2–5) som av de flesta omfattas av begreppet kemisk återvinning, men vi har valt att även inkludera de alternativen 1 och 6, då de också innebär en kemisk behandling för att åstadkomma återvinning.

1. Upplösning/utfällning
2. Depolymerisering
3. Solvolys
4. Pyrolys
5. Förgasning
6. CCU – kolin fångning och nyttiggörande

Det finns idag inte en helt vedertagen standard och därmed inga exakta definitioner av kemisk återvinning, men standardisering pågår. Som exempel på begreppsförvirringen kan nämnas att processerna solvolys och pyrolys leder till att polymeren bryts ner i mindre delar, det vill säga depolymeriseras (i bred bemärkelse) men att vi i denna studie använder begreppet depolymerisering snävare för en teknologi som kännetecknas av att polymerer av den typ som kallas kondensationspolymerer (se 4.1.1) delas upp i sina monomera beståndsdelar. I annan litteratur kan man dock ofta träffa på den mera breda betydelsen. Det är också ganska vanligt att man ser begreppen kemisk depolymerisering och termisk depolymerisering. Kemisk depolymerisering omfattar då ungefär processerna 2 och 3 enligt listan ovan, medan termisk depolymerisering motsvarar process 4.

Ett annat vanligt begrepp som finns i litteraturen är krackning, och ibland termisk krackning. I allt väsentligt kan man säga att båda dessa begrepp närmast motsvarar pyrolys, alltså process 4, men även förgasning, process 5, sorteras ibland in under termisk krackning.

4.1.1 Polymertyper och polymeriseringsreaktioner

Polymerer är ett väldigt brett begrepp under vilket man kan samla många material, både sådana som vi mer all dagligt kallar ”plaster”, men även andra, till exempel cellulosa, men här begränsas resonemanget till att handla om en indelning som är relevant just i sammanhanget kemisk återvinning. Beroende på vilka utgångsämnen man använder till polymerer och vilken typ av reaktion man utnyttjar för att åstadkomma en polymerisering, skiljer man på additions- och kondensationspolymerisering. Additionspolymerer fås genom att monomerer adderas till varandra, som namnet antyder, och förloppet används på monomerer med minst en dubbelbindning. De vanliga plasterna polyeten (PE), polypropen (PP) och polystyren (PS) är additionspolymerer. Dessa polymerer har ingen naturlig klyvningspunkt och klyvs därför slumpmässigt till kortare kolkedjor, med varierande längd, vid kemisk återvinning. Kondensationspolymerer heter så för att det generellt spjälkas av en liten molekyl vid

polymerisationen, oftast vatten eller metanol. Då bildas en ny kemisk bindning mellan byggblocken, exempelvis i form av eter, ester, syra eller amid. Polyetylentereftalat (PET), är den mest förekommande kondensationspolymeren. Polyamid (PA), Polykarbonat (PC) och polyuretan (PU) är tre andra vanliga kondensationspolymerer. Dessa typer av polymerer kan lättare klyvas förutsägbart och polymeriseringsreaktionen kan därmed i princip reverseras.

4.2 Upplösning/utfällning

Kemisk upplösning med efterföljande utfällning är den enklaste formen av återvinning av blandade och kontaminerade plastpolymerer. Genom att utnyttja olika polymerers löslighetsegenskaper kan polymerer separeras och renas från tillsatserna både organiska (till exempel flamskyddsmedel) och oorganiska (till exempel fyllmedel och fibrer). Produkten ut från processen är en polymer med liknade egenskaper som en ny polymer har, vilket ger möjlighet till ”closed-loop recycling” av polymeren till ursprungsprodukten. I denna återvinningsprocess bryts inga kemiska bindningar i polymeren. Därför diskuteras för närvarande klassningen av denna processteknologi och det finns förslag att klassa den som fysikalisk återvinning.

Branschorganisation CEFIC har klassat upplösning/utfällning som kemisk återvinning i sin senaste rapport². Denna återvinningsprocess är lämplig för strömmar där konventionella återvinningsmetoder såsom mekanisk återvinning inte kan användas på grund av lägre kvalitet och renhet av avfallsplastströmmarna, polymeren är värmekänslig eller att flera polymerer ingår i plastprodukten, till exempel laminatförpackningar. För ytterligare beskrivning hänvisas läsaren till dessa översiktsartiklar^{3, 4}.

4.2.1 Allmän teknologibeskrivning

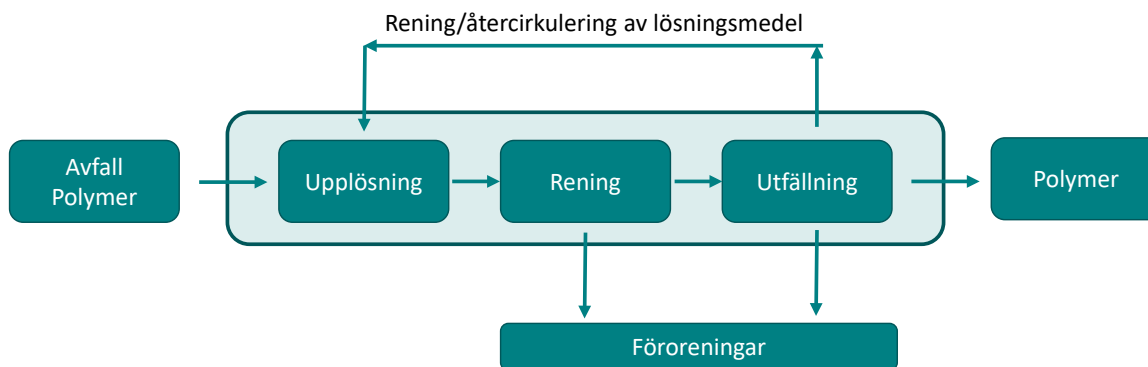
Processen beskrivs generellt i Figur 1. Ett försorterat plastavfall, med exempelvis förpackningar bestående av flera olika polymerer, tvättas och sönderdelas. Separation av de olika polymererna sker sedan med upplösning i ett miljövänligt lösningsmedelssystem med hjälp av värme (50-300 °C) där föroreningar som till exempel färg, flamskyddsmedel och fibrer och fyllmedel kan separeras bort. Den önskade polymeren, eller de önskade polymererna, separeras genom utfällning till fast material med ett antilösningsmedel och renas vidare till återvunnen polymer.

Denna processteknik producerar återvunnen polymer med jungfruliga materialegenskaper och avlägsnar effektivt föroreningar och tillsatser som minskar kvaliteten på den återvunna plasten. Detta innebär att många strömmar av blandat plastavfall som inte kan återvinnas med mekanisk återvinning kan generera högkvalitativa strömmar av återvunnen plastråvara för återanvändning till nya återvunna plastprodukter. Med denna upplösning/utfällningsåtervinningssteknik kan man separera olika polymerer från kontaminerade plaster/kompositer och återanvända den återvunna polymeren i den ursprungliga applikationen och möjliggör därför ”closed-loop recycling”.

² CEFIC 2020

³ Zhao 2018

⁴ Sherwood 2020



Figur 1. Generellt processschema för återvinning med upplösning/utfällningsmetoden.

4.2.2 Ingående plastavfallsströmmar/polymerer

Denna teknik kan användas för att rensa bort tillsatser som exempelvis färg, flamskyddsmedel, fyllmedel och fibrer från ett i övrigt väl sorterat plastavfall. Det kan också användas för att dela upp blandat eller sammansatt plastavfall och kompositplastmaterial som laminerade filmer i en eller flera återvinningsbara polymertyper. Optimalt för denna process är att använda en försorterad avfallsström med en dominerande polymertyp, till exempel PET eller PE.

Genom att använda upplösning kan defekta polymerer och annan kontaminering, som ansamlas under användning, rensas bort. Ett annat lämpligt scenario är en avfallsström där två polymerer med olika kemiska och fysikaliska egenskaper kan separeras från varandra och processas vidare i separata reningssteg till två slutprodukter. Denna teknik kan också användas för att separera kontaminerande avfallsströmmar som är svåra att hantera idag, till exempel avfallsströmmar som är kontaminerade av klorerade och bromerade ämnen, såsom flamskyddsmedel. Den kan även fungera som ett reningssteg innan polymeren eller polymerblandningen processas vidare med depolymerisering, pyrolys, solvolys etc.

Exempel på olika plastblandningar:⁵

- Tvåskiktmaterial PE och PA
- PE från flerskiktspåsar
- PET med barriärmaterial, färg eller andra tillsatser
- PET-PVC⁶ blandningar
- ABS-HIPS⁷ blandningar
- PS ur XPS och EPS⁸ från plastlaminat och begagnade produkter i en del fall kontaminerat med bromerade flamskyddsmedel
- Separation av plaster som innehåller flamskyddsmedel
- Termoplastkompositer med glas-, kol- och naturfiber
- Fragmenteringsmaterial från skrotning av uttjänta fordon och elektronik

⁵ Waldheim 2019

⁶ Polyvinylklorid

⁷ Akrylnitrilbutadienstyren/Modifierad polystyren ("High Impact")

⁸ Extruderad polystyren och expanderad polystyren

4.2.3 Material och kemikalieanvändning

Processen kräver ett eller flera lösningsmedel. Optimalt är att lösningsmedlet renas och återcirkuleras för att möjliggöra en ekonomiskt möjlig process. Olika polymerer kräver olika lösningsmedelssystem, ett som löser den specifika polymeren och ett antilösningsmedel som faller ut polymeren efter att föroreningar separerats. Val av lösningsmedel är utmanande. Viktiga parametrar att ta hänsyn till för val av lösningsmedel är till exempel specifik löslighet av polymer mot ingående föroreningar, återvinningsbarhet (låg kokpunkt) och toxicitet på människa och miljö. Det är också viktigt ur ett energiperspektiv att använda lösningsmedel med låg kokpunkt då destillation är en vanlig reningsteknik för använda lösningsmedel i kemiska processer.

I de pågående industriella processerna har lösningsmedel i många fall inte rapporterats då detta är en central del i dessa processer och behandlas med sekretess. I en del fall finns patent med många olika lösningsmedel listade.⁹⁻¹⁰ Några exempel på lösningsmedelssystem är att PET kan lösas i bensaldehyd, cyklohexanon och etylbensoat.¹¹ I den patenterade NewCycling-processen, utvecklad av APK AG används metylcyklohexan för att separera PE och PP från förpackningar med aluminiumbarriärer. Upplösning/utfällning av polyolefiner med CreaSolv® processen kan till exempel göras med selektiv upplösning av polyolefiner i ett lösningsmedel från gruppen alifatiska kolväten. Ett antilösningsmedel bestående av mono-/polyalkoholer, till exempel 1-propanol eller 1,3-propandiol, används sedan för att fälla ut polyolefinen från blandning.¹² Polystyvert använder lösningsmedlet para-kymén (4-isopropyl-1-metylbensen) för extraktion av PS. Detta lösningsmedel kan utvinnas från avfallsströmmar av citrusfrukter.¹³

4.2.4 Produkter och biprodukter/processavfall

Vid upplösning/utfällning återfås en återvunnen polymer, fri från tillsatssämnen, med likvärdig eller lägre kvalitet än ny råvara. Egenskaper kan skilja sig från nyproducerad polymer, detta eftersom det sker mekaniska och kemiska förändringar under produktens livslängd, exempelvis från påverkan av UV-ljus och kemikalier som är i kontakt med polymeren. Detta medför att polymerens kedjelängd ändras och defekta polymerkedjor kan bildas, vilket ger förändrade egenskaper på återvunnen polymer jämfört med nyproducerad polymer. Den återvunna polymerens egenskaper påverkas också av kvarvarande lösningsmedel och eventuellt andra tillsatssämnen. För att använda återvunna polymerer måste analys av mekaniska och kemiska egenskaper utföras och anpassas mot specifikation för lämplig slutprodukt.

4.2.5 Processen och "risk-ämnen" (substances of concern)

Upplösning/utfällningsmetoden (<250 °C) är en metod för att minska organiska och oorganiska föroreningar i kontaminerade plastavfallsströmmar samt separera olika polymerer i blandad plast. Här löses olika komponenter och plasten upp i olika reaktionssteg tills en renad plastpolymer kan kristalliseras ut. Efter indunstning av lösningsmedel får man en biprodukt av urlakade tillsatssämnen, både organiska- och oorganiska föroreningar:¹⁴

⁹ Vollmer et al. 2020

¹⁰ Zhao 2018

¹¹ Sherwood 2020

¹² Walker 2020

¹³ Vollmer et al. 2020

¹⁴ Wagner 2020

- Om tillsatserna är inerta och har oförändrad kemisk struktur så finns det potential för att tillvarata tillsatserna och återcirkulera till plastprodukter.
- Om tillsatset är tillståndspliktigt enligt bilaga XIV i REACH måste speciella tillstånd sökas för hantering av dessa tillsatser vid återvinning men inte om tillsatset går på destruktion. Detta kan medföra problem och extra kostnader för återvinningsaktören.
- I många fall kommer komplexa blandningar av tillsatser (till exempel färger) erhållas och destruktion via exempelvis förbränning är enda lösningen.

Ett exempel på en kombinationslösning för att återvinna och cirkulera både polymer PS och brom från blandningar av EPS och XPS från isolationsmaterial med det bromerade flamskyddsmedlet hexabromcyklododekan (HBCD) har initierats av PolyStyreneLoop-konsortiet och en anläggning för 3300 ton är under konstruktion i Nederländerna. CreaSolv® och Fraunhofer IVV är teknikleverantörer. Här kommer de bromerade biprodukterna att omvandlas i en bromåtervinningsanläggning för att generera elementärt brom som sedan kan återanvändas till icke klassade bromerade flamskyddsmedel. På detta sätt ska klassade tillsatser kunna destrueras säkert och beståndsdelarna återanvändas i cirkulära flöden.^{15,16,17,18}

4.2.6 Fördelar^{19,20,21}

- Farliga material, föroreningar och tillsatser som flamskyddsmedel och mjukgörare kan avlägsnas.
- Blandat avfall och laminerat plastmaterial kan återvinnas.
- Plastkompositer med fiberförstärkningsmaterial kan återvinnas.
- De återvunna plastmaterialen (polymerer) kan ha likvärdig kvalitet som jungfruliga material.
- Färgade plaster kan återvinnas. Detta ger tillgång till en större pool av avfall som i dagsläget inte återvinns eller ger en lågvärdig mekaniskt återvunnen produkt.
- ”Closed-loop recycling” är möjlig. Plastråvara kan recirkuleras till samma produkt.
- Jämfört med andra kemiska återvinningsprocesser är en stor fördel att återvinning med upplösning/utfällningsmetoden endast behöver klassisk kemisk processteknisk utrustning för upplösning, separation och reningssteg.

¹⁵ CreaCycle 2021b

¹⁶ Wagner 2020

¹⁷ PolyStyreneLoop u.å.

¹⁸ Schlummer 2017

¹⁹ Sherwood 2020

²⁰ Zhao et al. 2018

²¹ Vollmer et al. 2020

4.2.7 Nackdelar^{22,23,24}

- Kan inte konkurrera prismässigt med jungfrulig fossil polymerråvara.
- Behöver försorterade avfallsströmmar med dominans av en eller två polymerer med liknande föroreningsprofil för en mer optimerad process.
- Behöver ett högt utbyte (>70 %) samt att lösningsmedel recirkuleras för att processen ska bli konkurrenskraftig.
- Saknar i dagsläget de incitament som krävs för att kunna utvecklas för att hantera blandade kontaminerade plastströmmar.
- Behöver stora volymer antisolvent för utfällning. Utfällning med kylning och indunstning är ett miljövänligare alternativ.
- Höga processtemperaturer kan bryta ned polymeren vilket ger den sämre egenskaper. Även additiven kan då påverkas (negativt eller positivt).
- Återvunnen polymer kan ha andra fysikaliska och kemiska egenskaper jämfört med jungfrulig råvara, såsom kortare polymerkedjelängd.
- Restfraktioner av tillsatsämnen måste hanteras för destruktion.

4.2.8 Pågående initiativ

Unilever startade en pilotfabrik i Indonesien 2018 med produktionskapacitet på 3 ton material per dag baserad på CreaSolv®-tekniken (Fraunhofer IVV/CreaCycle GmbH). Här återvinns multimaterialplastförpackningar med 60 % PE-innehåll från engångsförpackningar i plast (schampo, tvättmedel etc.). Vilket utbyte av återvunnen PE som erhålls och vad som händer med resterande 40 % polymerer är inte rapporterat. Återvunnen PE används till återtillverkning av nya engångsförpackningar – ”closed-loop recycling”. Energiförbrukningen för återvinning av 6 kg PE är densamma som för produktionen av 1 kg jungfrulig PE-polymer, vilket möjliggör en cirkulär ekonomi med ett mindre miljöavtryck. Investeringskostnad för denna anläggning var cirka 10 miljoner Euro.

Unilever planerar för en fullskalig anläggning för cirka 30 ton material per dag men för att möjliggöra detta behöver insamlingen av material öka och infrastrukturen för insamling behöver utvecklas. Ett samarbete med Veolia och Unilever har startats angående logistik och insamling av plastavfall i Indien och Indonesien. En framtida uppskalning av denna teknik visar på en potential att minska CO₂-påverkan med 7800 ton/år för varje operativ enhet, vilket motsvarar 8200 ton/år multimaterialplastförpackningar.²⁵

APK:s Newcycling-process baseras på att lösa upp PE eller PP från flerskiktsplastförpackningar i ett lösningsmedelssystem bestående av alkaner, isooktan eller cykloalkaner. De upplösta polymererna utvinns från lösningen och pelleteras med extrudering. APK har byggt en fabrik på 8000 ton/år i Merseburg i Tyskland.²⁶

²² Sherwood 2020

²³ Zhao et al. 2018

²⁴ Vollmer et al. 2020

²⁵ CreaCycle 2021c

²⁶ Walker 2020

PureCycle Technologies (Ohio, USA) utvecklat av Procter & Gamble har en lösningsbaserad process där PP återvinns från postindustriellt och postkonsumentavfall. En anläggning är under konstruktion för 54 000 ton/år.²⁷

CreaSolv® demofabrik (Fraunhofer IVV/CreaCycle GmbH) för plastförpackningar i Lober i Tyskland för återvinning av multimaterialförpackningar baserade på PE/PA och PP/PET. Projektet initierades 2018.²⁸

PolyStyreneLoop konsortium. Konstruktion av fabrik i Terneuzen i Nederländerna baserad på CreaSolv®-tekniken (Fraunhofer IVV/CreaCycle GmbH) för återvinning av PS från EPS och XPS från isoleringsmaterial innehållande flamskyddsmedel (hexabromcyklododekan, HBCD) initierades 2016 och ska kunna processa 3300 ton per år. Pilotanläggningen kommer att monteras intill en befintlig bromåtervinningsenhet, vilket gör det möjligt att använda den HBCD-rika fraktionen från CreaSolv®-processen direkt för destruktion och omvandling av HBCD till bromföreningar, som i sin tur kan användas för att producera nya flamskyddsmedel.^{29,30}

MultiCycle (Horizon 2020). Konstruktion av pilotfabrik baserad på CreaSolv®-tekniken (Fraunhofer IVV/CreaCycle GmbH) för återvinning av termoplastiska kompositmaterial från fordon och multimaterialförpackningar, både fibrer och polymerer ska återvinnas, projektet initierades 2018.³¹

Worn Again. Konstruktion av demofabrik i Storbritannien för återvinning av PET från både färgade och ofärgade PET-förpackningar, flaskor och textilier (polyester). En tvåstegsprocess används där färg och föroreningar separeras i första steget vid 120 °C, där PET inte löses upp. I andra steget löses PET upp vid 180 °C. Den rena PET-polymeren kristalliseras sedan ut med 96 % utbyte. Exempel på lösningsmedel som är patenterade för upplösning är etylbensoat och bensylacetat. Lösningsmedlen återcirkuleras i processen. Då rester av lösningsmedel kan finnas i slutprodukten, PET, är det viktigt att använda icke toxiska lösningsmedel (CHEM21 solvents). Om polymeren ska användas i livsmedelsförpackningar måste den uppfylla samma krav som ny polymer.³²

Vinyloop® (Solvay, partners bland annat Ineos) återcirkulerade PVC-avfall med mjukgörare under 16 år 2002–2018, 11 500 ton/år (Italien, kabelplast) och 17 000 ton/år (Japan). Materialet återcirkulerades genom upplösning av PVC från avfall kontaminerat med textil och andra material. Processen baserade sig på ett lösningsmedelssystem med metyletylketon (MEK) och hexan vid 100 °C och 2.8 bar. Återvunnen PVC rapporterades ha samma kvalitet och

²⁷ PureCycle Technologies 2021

²⁸ CreaCycle 2021a

²⁹ PolyStyreneLoop u.å.

³⁰ Schlummer 2017

³¹ MultiCycle 2020

³² Sherwood 2020

sammansättning av mjukgörare som ny råvara. Denna ”closed-loop recycling” med avfall från PVC stoppades år 2018 och några av anledningarna var:³³

- Mjukgöraren dietylhexylftalat (DEHP) betraktas som ett särskilt farligt ämne (SVHC) enligt REACH och blev tillståndspliktigt enligt bilaga XIV (REACH) år 2015 och fick endast hanteras vid halter under 0,1 %, av alla aktörer utan tillstånd.
- Tillståndet för Vinyloop® gick ut 2018 och kostnaden för nya tillstånd var för stor.
- På grund av SVHC-klassning av DEHP började det dyka upp nya mjukgörare på marknaden, samtidigt som DEHP stannar kvar i produkter med lång livslängd (till exempel kablar) och i sjukhusprodukter där det fortfarande är tillåtet. Detta medför för en återvinningsaktör att alla olika mjukgörare behöver kunna hanteras. Då denna upplösningsprocess inte separerade bort mjukgörarna från PVC var man tvungen att stänga processen.

En ny tvåstegsprocess behöver utvecklas där man först selektivt separerar bort mjukgörare och sedan separerar PVC från övrigt avfall. I denna nya process behöver ett nytt lösningsmedelssystem optimeras.

4.3 Depolymerisering

Processen för depolymerisation använder olika kombinationer av kemi, lösningsmedel och värme för att bryta ner polymerer till monomerer. Monomerer är byggstenarna för polymerer. Dessa monomerer kan användas i befintlig processindustri för att producera återvunna polymerer som har likvärdig kvalitet som ny råvara tillverkad från fossila resurser. Fördelaktigt i denna process är avfallsströmmar med låg kontaminering men färgade och kontaminerat avfall kan också användas.³⁴

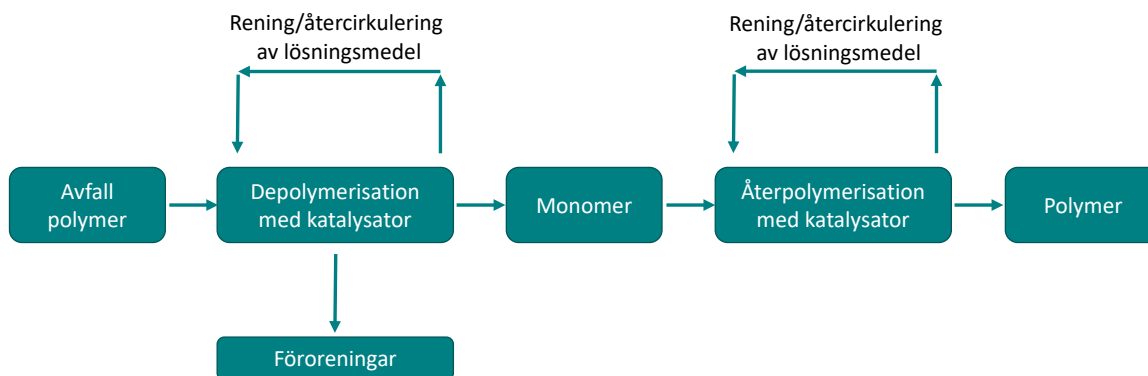
4.3.1 Allmän teknologibeskrivning

Plastavfallet tvättas och sönderdelas. Depolymerisering, nedbrytning av kemiska bindningar i polymeren, sker genom att plast, lösningsmedel och katalysator värms upp till 150–300 °C under atmosfärs- eller lågt övertryck (se Figur 2). Polymerkedjan som är uppbyggd av repetitiva byggblock, det vill säga monomerenheter, sönderdelas selektivt via en kemisk reaktion med hjälp av katalysatorn och frigör de monomera enheter som polymeren var uppbyggd av från början. Denna processteknik kan liknas vid lego, då polymerer som används i denna process är uppbyggda av repetitiva monomera enheter eller många ihopkopplade legobitar. Efter depolymerisering återfås de legobitar som använts från början för att bygga upp polymeren. Den återvunna monomeren renas genom till exempel filtrering och kristallation och kan sedan användas i befintlig processindustri för återpolymerisering till återvunnen polymer råvara. Denna återvunna polymer har likvärdig kvalitet som ny råvara producerad från fossilt ursprung. Många av dessa depolymeriserings-återvinningskoncept utvecklades på 1980/1990-talet men på grund av låg lönsamhet togs de ur bruk. Idag återtas många av de gamla utvecklade processkoncepten, som till exempel glykolys och metanolys för PET/polyester, i bruk igen och anpassas för färgade plast- och textila avfallsströmmar.³⁵

³³ Sherwood 2020

³⁴ Thiounn 2020

³⁵ Waldheim 2019



Figur 2. Generellt processschema för återvinning med depolymeriseringsmetoden.

4.3.2 Ingående plastavfallsströmmar/ polymerer

Exempel på polymerer som lämpar sig för denna återvinningsteknik är kondensationspolymerer PA, PC, PET, PLA (polymjölksyra) och PU. Dessa polymerer är sammanlänkade med till exempel ester-, amid-, eller andra kemiska bindningar som selektivt kan klyvas med hydrolys, det vill säga polymerers tillverkningsprocess reverseras och polymerens ursprungliga byggblock kan genereras (monomerer). Här kan synergier ske med avfallsströmmar från syntetiska textilier som är baserade på polyester (PET) och nylon (PA). Plastavfallsströmmar som har ett lågt värde vid mekanisk återvinning på grund av tillsatser, fyllnadsmedel och fibrer är lämpliga för depolymerisering.

4.3.3 Material och kemikalieanvändning

Processen kräver ett lösningsmedel som kan lösa polymeren och en katalysator för att möjliggöra selektiv nedbrytning av polymeren till monomerer av hög kvalitet. Viktiga parametrar för val av lösningsmedel är till exempel specifik löslighet av polymer mot ingående föroreningar, återvinningsbarhet (låg kokpunkt) och toxicitet. Det är viktigt ur ett energiperspektiv att använda lösningsmedel med låg kokpunkt då destillation är en vanlig reningsteknik för använda lösningsmedel i kemiska processer. Exempel på lösningsmedel för PET-depolymerisering är etylenglykol (glykolys), metanol (metanolys) och vatten (hydrolys). För att bygga en ekonomiskt möjlig process så måste lösningsmedlet renas och återcirkuleras. Katalysatorn i processen bör vara av låg kostnad och även denna möjlig att återanvända genom lämplig återaktivering och recirkulering till processflödet.

4.3.4 Produkter och biprodukter/processavfall

För depolymerisering eller lågtemperatur-solvolyt (<250 °C) vill man få en ren slutprodukt av plastens byggsten, det vill säga monomer. Om plastavfallsströmmar som används är av hög renhet och ofärgade, får man en renare slutprodukt (monomer). I kontaminerade och färgade plastavfallsströmmar måste ibland en tvättprocess införas som ett försteg för att lösa ut dessa tillsatser ur plasten. I sådana fall är det samtidigt viktigt att plastpolymeren inte påverkas. Till exempel är det vanligt att alkoholer används för att lösa ut färger och tillsatser i PET-avfall. I denna process får man efter rening av monomeren, till exempel via destillation eller kristallisation, också en biprodukt som består av urlakade tillsatser. Då kan det vara så att tillsatserna (oorganiska och organiska) är inerta eller att de påverkats kemiskt/termiskt och bildat en ny kemisk förening eller polymer. Till exempel är färgämnen reaktiva under dessa betingelser.

Återvunnen plastmonomer är efter rening, av likvärdig kvalitet som nytillverkad monomer från fossil råvara. Den kan polymeriseras till ny återvunnen polymer av hög kvalitet som är likvärdig med ny plastråvara och kan därför användas även till livsmedelsförpackningar.

4.3.5 Processen och "risk-ämnen" (substances of concern)

End-of-Life plastavfall kan innehålla olika tillsatser som efter processen återfinns i en separerad restfraktion:

- Om tillsatserna är inerta och har oförändrad kemisk struktur så finns det potential för att tillvarata tillsatserna och återcirkulera dem till plastprodukter.
- Om tillsatset är tillståndspliktigt enligt bilaga XIV i REACH måste speciella tillstånd sökas för hantering av dessa tillsatser vid återvinning men inte om tillsatset går till destruktion. Att ämnet är tillståndspliktigt enligt bilaga XIV i REACH kan medföra problem och extra kostnader för återvinningsaktören.
- I många fall kommer komplexa blandningar av tillsatser (till exempel färger) erhållas och destruktion, via till exempel förbränning, är enda lösningen.

4.3.6 Fördelar

- Färgade plaster och plaster med andra tillsatser kan återvinnas. Detta ger tillgång till en större pool av avfall som i dagsläget inte återvinns eller ger en lågvärdig mekaniskt återvunnen produkt.
- Farliga material, föroreningar och tillsatser som flamskyddsmedel, färg och mjukgörare kan avlägsnas.
- Den återvunna monomeren har likvärdig kvalitet som jungfruliga material och kan användas för produktion av livsmedelsförpackningar.
- Återvunnen monomer kan polymeriseras i befintliga industrialiserade processer för produktion av polymer. Inga nya polymeriseringsprocesser behöver utvecklas.
- "Closed-loop recycling" – är möjligt det vill säga plastråvara kan recirkuleras till samma produkt.

4.3.7 Nackdelar

- Kan inte konkurrera prismässigt med jungfrulig fossil monomer råvara.
- Behöver försorterade avfallsströmmar med dominans av en eller två polymerer med liknande föroreningsprofil för en mer optimerad process med höga utbyten av monomerer.
- För att få en kommersiellt användbar teknik är det viktigt att kunna återanvända katalysatorn eller ha en katalysator med låg kostnad.
- Förprocesssteg för avfärgning och tillsatserna kan behövas (upplösning/filtrering), som kan kräva stora volymer av lösningsmedel som måste recirkuleras.
- Rening och recirkulering av lösningsmedel krävs.
- Restfraktioner av tillsatserna måste hanteras för destruktion.

4.3.8 Pågående initiativ

Många olika industriaktörer har aviserat att de har startat utveckling för kemisk återvinning av PET/polyester från plast- och textilavfall med detta tekniskspår. Det är depolymeriseringsprocesser med glykolys (etylenglykol-lösningsmedel) eller metanolys (metanol-lösningsmedel). Några

aktörer är bland annat: Garbo Srl (glykolys), IBM (VolCat, glykolys), BP (Infinia), Dupont-Teijin Films (LuxCR, glykolys) och Eastman (glykolys och metanolys), Loop Industries Inc (metanolys). Informationen om processerna är ofta begränsad på grund av sekretess och patent. Några exempel på processutveckling av PET-depolymerisering bifogas nedan.³⁶ Andra processutvecklingsatsningar i demo- och pilotskala finns för avfallsströmmar av PA (polyamid, nylon), PU-skum (polyuretan) och PC (SABIC).^{37,38}

JEPLAN INC. ("Pet Refine Technology", Kawasaki, Japan) var först att kommersialisera en glykolysprocess redan 2008. De återvinner 20 000 ton färgade PET-flaskor per år och monomeren bis(hydroxyetylen)tereftalat (BHET) återvinns och används för produktion av nya återvunna PET-flaskor det vill säga "Closed-loop recycling".^{39,40}

Eastman har en fullskalig anläggning för depolymerisering av polyestertyg i USA (Polyester Renewal Technology) baserad på glykolys. De planerar också att starta en ny anläggning 2022 baserad på deras gamla teknik från 1980-talet (Eastman Kodak) där de separerade silver från PET-film med metanolys.⁴¹

Ioniqa Technologies (Eindhoven, Nederländerna) har startat en demoanläggning 2019 där man kan processa 10 000 ton ofärgat och färgat PET-avfall. Deras glykolysprocess rapporteras ge högt utbyte 93 % av BHET-monomeren vid depolymerisering vid 200 °C. Processen katalyseras av en magnetisk katalysator som också fungerar som färgavskiljare genom adsorption. Katalysatorn kan sedan lätt avskiljas med hjälp av magnetism i procesströmmen och sedan regenereras för återanvändning i processen.^{42,43}

I Sverige har **RISE med samarbetspartners Axfoundation, Axfood, Axel Johnson International, Diab Group, Nexam Chemicals, National Högsäter, Sporda Nonwoven, Recytec , Perstorp , Tarkett, FTI, Didriksons Regnkläder och FOV Fabrics** drivit ett nationellt RE:Source-projekt, "Kemiskt återvunnen PET/polyester som råvara för additiv och ny polymer", som nyligen avslutats.⁴⁴ Färgat industrispill som ej återvinns idag av polyester, i form av använda spännband, textilspill och PET-förpackningar med kvarvarande etiketter, färg och film har materialåtervunnits genom depolymerisering med glykolysmetoden. Produkten efter återvinning är en ren monomer, som kan bli råvara för syntes av additiv, men också användas som byggsten för ny PET-plast. Nästa steg i utvecklingen har beviljats anslag av Vinnväxt Klimatledande Processindustri för ett mindre projekt med start i januari 2021. Den

³⁶ Vollner et al. 2020

³⁷ Waldheim 2019

³⁸ SABIC 2019

³⁹ JEPLAN u.å.

⁴⁰ Thiounn 2020

⁴¹ Seppä Eastman, I. 2020. Mailkorrespondens

⁴² Thiounn 2020

⁴³ Ioniqa 2019

⁴⁴ RISE 2020

kompletterande forskningen kommer bidra till en bredare grund inför nästa ansökan för utveckling av processteknologin samt logistikflöden inom Skandinavien.

4.4 Solvolys

Solvolys (HTL, hydrothermal liquefaction, hydrotermisk förvätskning) är en termokemisk process som vid hög temperatur och tryck bryter ned alla organiska polymerer som trä, papper och plast till en oljeprodukt. Därför kan blandade och kontaminerade avfallsfraktioner från plast processas med denna teknik. Sub-/superkritiskt vatten (200–400 °C, 50–250 bar) används som lösningsmedel och plastpolymererna bildar en oljefraktion som kan användas för vidare uppbyggnad i raffinaderier till bränsle- och kemikalieprodukter. I solvolys används ofta vatten som lösningsmedel och beroende på om temperatur och tryck i solvolysen är under eller över vattnets kritiska punkt (374 °C, 221 bar) definieras solvolysprocessen som subkritisk (under kritiska punkten) eller superkritisk (över kritiska punkten). Polymerens kemiska struktur och löslighet samt önskad kemisk sammansättning av oljeprodukten är parametrar som påverkar valet av sub- eller superkritisk solvolysprocess.^{45,46,47}

4.4.1 Allmän teknologibeskrivning

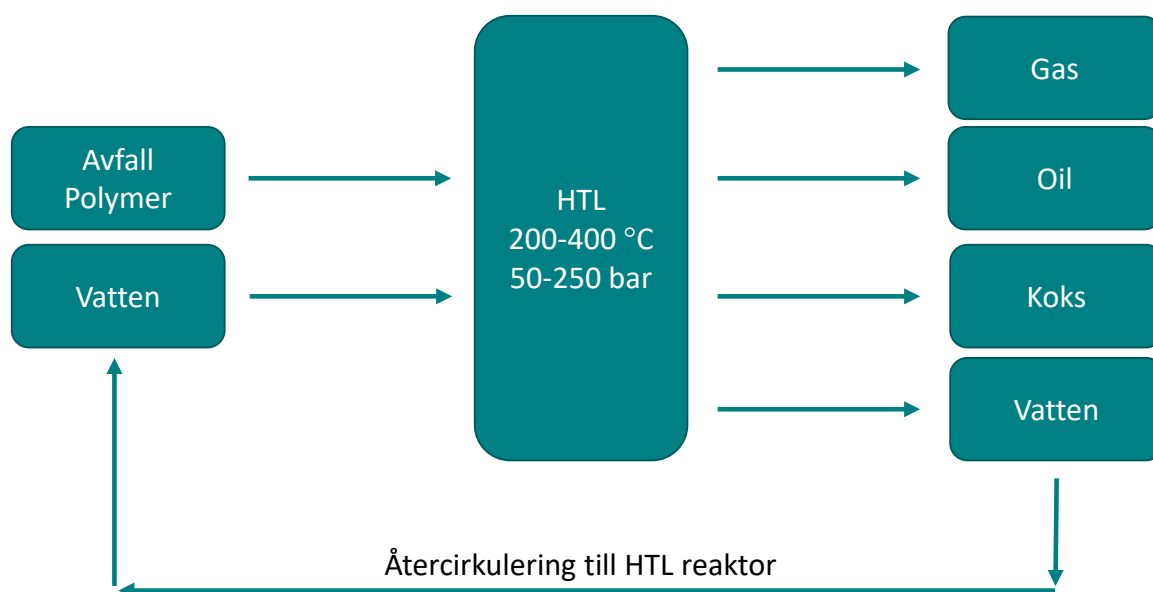
Solvolys/HTL använder sig av sub-/superkritiskt vatten (200–400 °C, 50–250 bar) som media för nedbrytning av polymerer till gas, olja, vattenlösliga föreningar och koks. Sub-/superkritiska betingelser medför att vatten har egenskaper mellan vätska och gas och kemin kan justeras genom att variera temperatur och tryck. Vattnet får unika egenskaper och liknar ett organiskt lösningsmedel som till exempel aceton och kan därför lösa plastpolymerer och andra organiska polymerer. Om nedbrytningen sker över den superkritiska punkten för vatten (>374 °C, >221 bar) så kan vatten också fungera som vätekälla och donera väte till reaktionsprodukten. Eftersom detta är en vattenbaserad återvinningsprocess så behöver den ingående avfallsströmmen inte torkas, vilket är en stor fördel.

Processen för solvolys/HTL illustreras i Figur 3. Plasten mals och förvärms och blandas till en slurry med vatten som pumpas in i reaktorn med sub-/superkritiska temperaturer (200–400 °C, 50–250 bar). Genom hydrolys och termisk sönderdelning delas polymeren upp i olika kemiska fragment. Efter kylning av processflödet sker en fassetparation av vatten och olja. Detta är väldigt fördelaktigt då vattenlösliga organiska molekyler och oorganiska salter separeras från oljan. Detta ger en stabilare och mindre reaktiv oljeprodukt än till exempel pyrolysolja. Det separerade vattnet kan sedan recirkuleras tillbaka i processen eller renas. Oljeprodukten renas sedan vidare i raffinaderiprocesser till kända fraktioner som nafta, diesel och tyngre oljor. Beroende på ingående plaster kan också andra kemiska byggblock bildas, så som aromater och fenoler.

⁴⁵ Seshasayee 2020

⁴⁶ Pedersen 2017

⁴⁷ dos Passos 2020



Figur 3. Generellt processschema för återvinning med solvolys/HTL-metoden.

4.4.2 Ingående plastavfallsströmmar/polymerer

Idag utvecklas processkoncept på de plaster som liknar fossil olja och har hög andel kolväten, det vill säga PP, LDPE, HDPE, PP, PET och PS. Solvolys har dock möjlighet att bryta ned en bredare ström av plastavfall, till exempel även i form av PA, PC, PLA, ABS, PVC och hårdplaster (epoxi, polyester och PU). I solvolys kan mer komplicerade avfallsströmmar, det vill säga blandade, kontaminerade plaster (till exempel från mat och papper), kompositer och flerskiktsplastförpackningar, användas utan förseparation och torkning av avfallet.^{48,49,50}

Det som styr nedbrytningen är den kemiska strukturen. Kondensationspolymerer kan brytas ned med hydrolys vid lägre temperaturer och subkritiska betingelser (upp till 350 °C och 250 bar) då reaktiva kemiska bindningar finns som eter, ester och amid. Polyolefiner och polystyren (PP, PE, PS) består av kolvätekedjor och kräver högre temperatur och superkritiska förhållanden (över 350 °C och 250 bar) för nedbrytning.⁵¹

Plastavfallströmmar innehållande halogener som klor, brom och fluor (Cl, Br, F) kommer också kunna sönderdelas. Halogener bildar sura gaser så som saltsyra (HCl) i alla termokemiska processer, vilket kan leda till korrosion av utrustningen och bidrar även till att katalysera koks bildning. I solvolys minskas denna effekt då vattnet löser upp dessa sura gaser och minskar på så sätt oönskade bireaktioner. Detta medför också att brom- och klorinnehållande molekyler ofta kan effektivt separeras från produktoljan direkt i solvolysprocessen.

4.4.3 Material och kemikalieanvändning

Vatten vid höga temperaturer och tryck (200–400 °C, 150–250 bar) får egenskaper av ett organiskt lösningsmedel och kan fungera som lösningsmedel och katalysator i dessa

⁴⁸ Pedersen 2017

⁴⁹ dos Passos 2020

⁵⁰ Seshasayee 2020

⁵¹ dos Passos 2020

solvolysprocesser. Andra vanliga tillsatssämnen som används som katalysatorer är natrium- och kaliumhydroxid/-karbonat. Ibland användes också ett organiskt lösningsmedel till exempel alkoholer för att underlätta upplösningen och förhindra oönskade bireaktioner som koksbildning. Vattnet kan recirkuleras i processen efter ett reningssteg.

4.4.4 Produkter och biprodukter/processavfall

Beroende på temperatur och tryck erhålls gas, olja och vattenfraktion samt koks.

- Gas: Bildas om reaktion sker vid superkritiska förhållanden (över 350 °C och 250 bar).
- Olja: Bildas av nedbrutna organiska material som plastpolymerer.
- Vatten: I vattnet finns vattenlösliga organiska molekyler och salter upplösta.
- Koks: En fast kolprodukt. Högmolekylär organisk fraktion bestående av polymeriserade aromatiska kolväten. Bildas av reaktiva organiska fragment under processen.

Oljeprodukten från solvolys har ofta högre stabilitet jämfört med pyrolysolja då vattenfraktionen löser upp mindre vattenlösliga reaktiva kemiska föreningar (syror, alkoholer), oorganiska salter som bildats av metaller och halogener (brom och klor).⁵²

4.4.5 Processen och "risk-ämnen" (substances of concern)

Solvolys har stor potential att rena blandade och kontaminerade avfallsströmmar från olika tillsatssämnen och metaller.⁵³ I denna process kan halogener och metaller joniseras och lösas upp i vattnet som separeras från oljan. Detta medför att den producerade oljeprodukten får ett lågt innehåll av metaller och halogener.⁵⁴

Vid solvolys/HTL av bromerade flamskyddsmedel från HIPS och ABS från elektronikplast med superkritiskt vatten ser man ett helt annat reaktionsmönster än vid pyrolysis där brominnehållande produkter ofta kontaminerar oljan.⁵⁵ I solvolys tenderar brominnehållande föreningar att överföras till vattenfasen som både organiska föreningar och som oorganiska joner. Detta medför att oljeprodukten från solvolys har låga nivåer av brom. Detta är ett forskningsfält som behöver vidare studier och utbyten och procenthalter av föroreningar är svåra att jämföra mellan olika tekniker och studier. Det finns solvolysstudier utförda på glasfiberkomposit från förbrukade vindturbinblad. Detta är en av de mest komplexa avfallsströmmarna att återvinna. Ett vindturbinblad består av en okänd blandning av plaster (hårdplaster, termoplaster och ytlager) och andra material (balsaträ, fyllmedel och glasfiber). En av termoplasterna som använts i vissa vindturbinblad är PVC. Med solvolysmetoden kunde en fördelaktig separation av klor från PVC från vindturbinblad erhållas och den bildade solvolysoljan hade låga nivåer av klor.⁵⁶ Generellt verkar solvolys ha en större potential för att rena kontaminerade plastströmmar med halogener (Br, Cl, F) än pyrolysis.⁵⁷

⁵² Lyckeskog 2017

⁵³ Zhan 2020

⁵⁴ Lyckeskog 2017

⁵⁵ Ma 2016

⁵⁶ Mattsson 2020

⁵⁷ Wang 2012

Många tillsatssämnen innehåller också andra heteroatomer som kväve (N) och syre (O) (till exempel från färgämnen och ftalater) och eftersom vatten används som lösningsmedel så hydrolyseras dessa kol-kväve och kol-syre kemiska bindningar och vattenlösliga produkter hamnar i vattenfasen istället för oljan. Detta leder till större möjlighet att eliminera kontaminerande ämnen i plastavfallsströmmar och samtidigt få en renare oljeprodukt. Till exempel kommer mjukgörare, så kallade ftalater, kunna oskadliggöras med denna solvolysteknik. Esterbindningen i ftalaten kommer att hydrolyseras till en syra och alkylalkohol i ett första steg och vidare till kolväten som kommer ingå i oljeprodukten.

4.4.6 Fördelar

- Blandade och kontaminerade plaster kan kemiskt återvinnas.
- Har potential att användas för att rena upp komplexa kontaminerade avfallsströmmar från halogener och metaller som ett försteg innan vidare kemisk återvinning.
- Vatten används som lösningsmedel, detta är ett miljövänligt lösningsmedel som kan återcirkuleras i processen.
- Ingående plastråvara behöver ej torkas eftersom processen är vattenbaserad vilket ger en fördel jämfört med pyrolys.
- Solvolys ger en stabilare oljeprodukt än pyrolys då reaktiva föreningar separeras bort i vattenfasen.

4.4.7 Nackdelar

- Höga temperaturer och tryck kräver stor åtgång av energi och ställer höga krav på processutrustningen.
- Organiska lösningsmedel (till exempel etanol och fenol) kan behövas som additiv för att stoppa bildning av biprodukter som koks.
- Komplex sammansättning av oljan, som måste gå igenom ytterligare steg för att isolera användbara molekyler.
- Betydande förluster om plasten ska återvinnas tillbaka till plast igen.

4.4.8 Pågående initiativ

ReNew ELP (Licella Cat-HTR™ teknik, Mura Technology Limited, Armstrong Energy).

En anläggning är under uppbyggnad i Wilton (UK) med kapaciteten 20 000 ton/år med rapporterad start Q1 2021. Anläggningen ska processa uttjänt konsumentplastavfall bestående av LDPE, HDPE, PP, PET och PS. Utbytet av oljeprodukten rapporteras vara 80 vikt%, det vill säga 16 000 ton oljeprodukt. De har dessutom tillstånd för att bygga ut med ytterligare tre linjer med samma kapacitet i Wilton (totalt 80 000 ton/år).⁵⁸

En förvärmad slurry av plast och vatten överförs till Cat-HTR™ reaktor (400 °C, över 220 bar), där superkritiskt vatten bryter ned plasten, under ca 20 min, till en oljeprodukt baserade på kortkedjiga kolväten. Syre avlägsnas som koldioxid. Vattnet fungerar som väteälla och bildar väte vilket ger en stabil oljeprodukt med kortkedjiga mättade kolväten, vilket medför att ingen ytterligare vätgas behövs i processen. Efter reaktionen kyls flödet och tre produkter separeras; gas, oljeprodukt och vattenlösning. Vattenfraktionen recirkuleras till ny slurry-beredning i processen. ReNew ELP rapporterar att inga toxiska biprodukter bildas.

⁵⁸ ReNew ELP 2020

Den initiala oljeprodukten är stabil, det vill säga kan transporteras, är icke-sur och kan användas av fossila bränsleraffinaderier. Oljeprodukten förädlas genom destillation till fyra kommersiella produkter; nafta, destillerad gasolja, tung gasolja och tunga vaxfraktioner. Alla produkter registreras för närvarande under REACH för att tillåta export till EU. Denna process genererar också aromater, som fenoler, som kan förädlas till kemikalier. Fördelaktigt med denna Cat-HTR™ teknik är att man kan processa en bredare avfallsström, det vill säga blandade, kontaminerade plaster (till exempel från mat och papper), inklusive flerskiktsplastförpackningar, utan behov av separering och torkning.

Licella™ Holdings lokaliserade i Australien har utvecklat denna Cat-HTR™ teknik under 13 år och byggt upp en plattform med olika processbetingelser för olika ingående restproduktströmmar, till exempel från skogen (sågspån, lignin) och plastavfall. De har för närvarande en stor pilotanläggning i drift sedan 2012 som kan processa 10 000 ton slurry årligen.⁵⁹ Licella har också pågående projekt i Australien där de tillsammans med iQRenew ska konstruera en anläggning för plastavfall på 20 000 ton/år. Licella™ har också ett forskningssamarbete med Neste som startades 2018, för att undersöka möjligheten att använda plastavfall till en förvätskad oljeprodukt.⁶⁰

4.5 Pyrolysis

Pyrolysis är en termisk process som sker i en syrefri eller syrefattig miljö, där organiska molekyler (till exempel plast) bryts sönder till mindre beståndsdelar. Processen drivs utan att det tillförs någon luft eller syre, däremot så kan det följa med syre i materialet. Pyrolytiska processer drivs ofta i temperaturer omkring 400 °C och uppåt. Många olika processkoncept förekommer och resultatet varierar beroende på många ingående parametrar. För mer djupgående kunskap om pyrolysis av plast^{61,62} och/eller biomassa⁶³ hänvisas läsaren till litteraturen.

4.5.1 Allmän teknologibeskrivning

Vid höga temperaturer bryts polymermolekyler ner till mindre beståndsdelar, som i sin tur kan sönderdelas ytterligare. De molekyler som bildas kommer till stor del vara fria radikaler.^{64,65} Beroende på flera faktorer, bland annat temperatur och uppehållstid, så kan dessa molekyler brytas ner ytterligare eller reagera vidare. Väte kan introduceras i processen för att mätta dubbelbindningar och väte kan fördelas mellan molekylerna. Små molekyler med få kolatomer och en relativt hög andel väte per kolatom (H/C) blir gasformiga. Medelstora molekyler med en medelhög andel H/C kondenserar till olja. Stora molekyler, ofta polycykliska aromatiska kolväten (PAH), med ungefär lika många H som C kondenserar som tjära. Det bildas också en del koks som är extremt stora molekyler av i stort sett bara C.

⁵⁹ Licella 2021

⁶⁰ Licella 2018

⁶¹ Waldheim 2019

⁶² Gao 2010

⁶³ Andersson et al. 2020

⁶⁴ Gao 2010

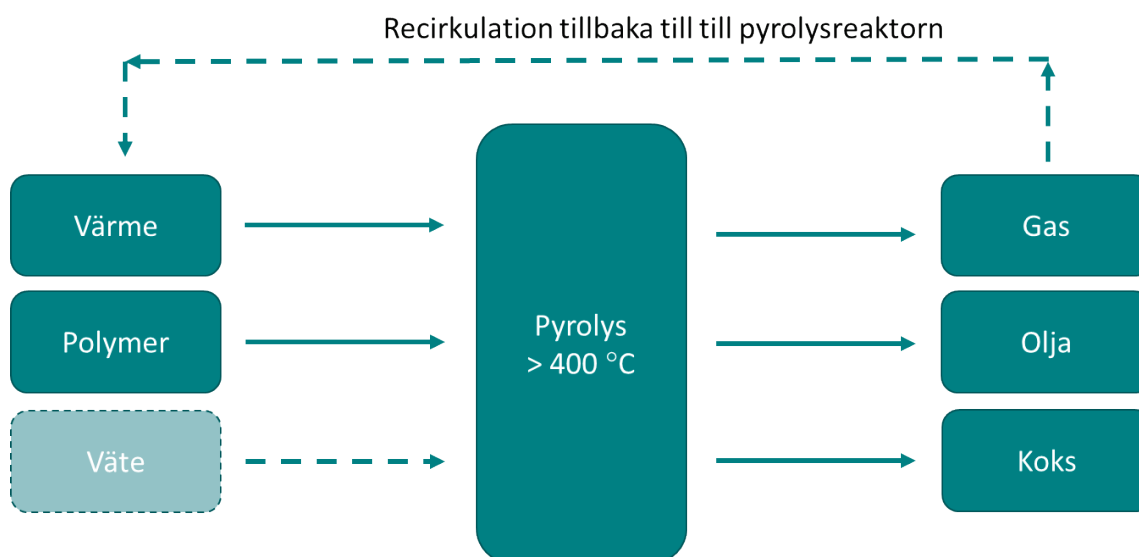
⁶⁵ Zimmermann & Walzl 2012

Det är inte nödvändigt att använda katalysator i pyrolysen. En katalysator kan däremot bidra till att mer specifika molekyler bildas, ofta i riktning mot de gasformiga molekyler. Högre temperatur kan också leda till en högre andel gasformiga molekyler. Vid pyrolytiska processer så talas ofta om "severity" där en högre "severity" innebär att molekylerna bryts ner till mindre beståndsdelar (kortare kolväten) och en lägre "severity" innebär att molekylerna bryts ner till större beståndsdelar (längre kolväten). De processer som verkar vara mest aktuella för kemisk återvinning av plast i dagsläget har en låg "severity" då den primära produkten ut är framförallt olja, det vill säga längre kolväten.

En process för pyrolysis av plastavfall för att producera olja kan se ut ungefär enligt följande (illustreras i Figur 4). Först sorteras, mals och tvättas plasten för att få bort större mängder PVC, papper, matavfall, stenar, metall och annat material som kan orsaka problem i processen. De malda och tvättade plastbitarna torkas och matas sedan in i processen på ett sätt som medför att så lite luft som möjligt följer med in i reaktorn, antingen genom att plasten smälts ner först, eller genom att plasten pressas samman för att tränga bort luft, eller genom att den matas in genom en syrefri/syrefattig gas (exempelvis kvävgas, recirkulerad syntesgas eller vätgas). Plasten hettas upp till en temperatur över 400 °C, exakt hur högt varierar från process till process, vilket sönderdelar plastmolekyler i mindre molekyler. Dessa molekyler är nu så pass varma att de har förångats och förs vidare till en kondensator, eller ofta flera kondensatorer, där större molekyler (med hög kokpunkt) kondenserar först och kortare molekyler (med lägre kokpunkt) kondenserar senare. På så sätt kan oljan delas upp i olika kvalitet, på liknande sätt som i ett raffinaderi. Ibland ingår också ett katalytiskt steg mellan själva pyrolysen och kondenseringen, för att få fram mer önskvärda egenskaper på oljan. I det katalytiska steget kan det tillföras exempelvis vätgas.

De allra minsta molekylerna kondenserar aldrig, utan förblir som en gas. Kvar i reaktorn förblir en fast rest i form av koks och en del tjära. Tjäran kommer också fastna längs med väggar och på andra problematiska ställen. De komponenter som har lägst ekonomiskt värde, oftast gasen eller delar av gasen, eventuellt ihop med koks och tjära, används som bränsle för att ge värme åt reaktorn. Om koks inte bränns som en del i processen så kan det användas som ett energirikt bränsle av någon annan anläggning som får bränna avfall, så som avfallsförbränning eller cementindustri. Tjäran kan exempelvis hanteras via termisk destruktion genom att den bränns upp på plats, eller via skrubbing med organiska vätskor.⁶⁶

⁶⁶ Waldheim 2019



Figur 4. Generellt processschema för återvinning genom pyrolys. Ljusa och streckade detaljer är flöden som kan finnas, men inte är nödvändiga för en pyrolysisprocess.

4.5.2 Ingående plastavfallsströmmar/polymerer

En pyrolysisprocess kan i princip hantera nästan vilket material som helst. Om det kan förbrännas så kan det pyrolyseras. Däremot så kan olika material vara mer eller mindre önskvärda beroende på vilka produkter som ska skapas. Om målet är att skapa en olja bestående av diverse kolväten så är det också önskvärt att starta med kolväten, alltså ett material som innehåller så mycket C och H som möjligt samtidigt som det innehåller så lite som möjligt av andra grundämnen. Några exempel på sådana plaster är PE, PP och PS. Men eftersom det samtidigt är önskvärt att ha ett billigt startmaterial så får det gärna vara i mixade fraktioner som är svåra att sälja till mekanisk återvinning, exempelvis i form av flerskiktspast (laminat) eller blandad mjukplast.

Obrännbart material i ingående material ger en större mängd fast restprodukt (aska). Plaster som PVC ger också en stor mängd restmaterial, eftersom det innehåller mestadels klor (Cl) och väldigt lite väte (H), vilket medför att det mesta av kolet stannar kvar som koks. Det kan också ge problem i form av korrosion, gasen måste renas från väteklorid och produkten (oljan) riskerar att få en förhöjd halt klor. Det blir en liknande situation med annat material som också innehåller klor (exempelvis i form av salt från matrester) och andra halogener som fluor och brom, exempelvis från teflon eller bromerade flamskyddsmedel. Kväve från PU, PA, ABS, matrester eller luft, riskerar också att hamna i oljan. Likadant med svavel (S) från exempelvis matrester. Plaster (och annat material) som innehåller syre (så som PET, PU, PA, PC, PMMA och vissa bioplaster) ger ett lägre oljeutbyte då en del av kolet avgår som kolmonoxid (CO) eller koldioxid (CO₂) samtidigt som det riskerar att ge upphov till fenoler och organiska syror. Den aromatiska strukturen i exempelvis PET riskerar dessutom att bilda en större andel koks.

Alla dessa orenheter är hanterbara, men de skapar problem som måste hanteras i form av underhåll och efterbehandling, vilket kostar pengar. Värst är om orenheterna varierar mycket över tid, i oförutsägbara intervall.

4.5.3 Material och kemikalieanvändning

De enda material som egentligen behövs för en pyrolysisprocess är själva anläggningen och materialet som ska behandlas. Det är även möjligt att införa väte i processen, antingen genom vattenånga eller vätgas. Det är också möjligt att använda katalytiska material, antingen i själva pyrolysen eller i ett senare steg. Då används oftast relativt billiga katalytiska material, så som zeoliter, eftersom dessa material har en tendens att förbrukas relativt snabbt. Det kommer också behövas material och kemikalier för att hantera de orenheter som kommer in i processen. Där är detaljerna sparsamma förutom att det exempelvis kan behövas kalk för att neutralisera sura rökgaser.

4.5.4 Produkter och biprodukter/processavfall

Det bildas gas, olja och koks. Det bildas även en del tjära, som kan ses som en del av antingen oljan eller den fasta resten (koks). Förhållandet mellan dessa och den exakta sammansättningen av exempelvis gas och olja, varierar mellan olika processer. Vid de processer som ser ut att vara mest aktuella för kemisk återvinning så är oljan den primära produkten.

I de processer där olja är den primära produkten så bränns oftast tjära och koks antingen upp på plats i en termisk rening av systemet, eller som bränsle i processen för att skapa den värme som behövs för att driva pyrolysen. Det kan också brännas i exempelvis en avfallsförbränning eller cementugn. Gasen kan delas upp i värdefulla delar som kan säljas, samt mindre värdefulla delar som eventuellt bränns på plats för att skapa den värme som behövs för att driva pyrolysen.

De flesta företag som bedriver kemisk återvinning av plast genom pyrolysis, där den primära produkten är en pyrolysolja, hävdar att omkring 70–75 % (massprocent) av plasten omvandlas till olja. Då krävs det dock ytterligare reningssteg för att göra oljan tillräckligt ren för att kunna användas, istället för fossil nafta, i en cracker som används för att skapa monomerer till plastproduktion. Eftersom pyrolysoljan har en annan kemisk sammansättning än en fossil nafta så kommer omvandlingen till monomer/polymer också skilja sig, troligtvis genom att det blir högre förluster i det omvandlingssteget än vad det skulle vara från en fossil nafta. Det är viktigt att ha i beaktande om en återvinningsmängd ska beräknas utifrån en massbalans-princip. Det kan också sätta begränsningar på hur hög andel pyrolysolja en cracker kan ta in i förhållande till fossil nafta. Exakt hur mycket förluster som uppstår i hela processen från plast, via pyrolysis, tillbaka till plast är inte helt utrett i den här studien, men det är helt klart betydande förluster i ett sådant kretslopp.⁶⁷

Om processen använder en katalysator så kommer den efter hand att förbrukas och behöver tas om hand som ett fast avfall. Det kommer också att skapas en del fasta restprodukter från försorteringen och tvättningen av plastavfallet, vilket kan exempelvis brännas ihop med koks. Sådan förbränning leder till bildning av aska som måste tas om hand på motsvarande sätt som från en avfallsförbränning. Tvättvatten från tvättningen av plastavfallet måste renas i en vattenreningsanläggning.

⁶⁷ Hann & Connock 2020

4.5.5 Processen och "risk-ämnen" (substances of concern)

Organiska föreningar (exempelvis ftalater) kommer brytas ner i sina mindre beståndsdelar på samma sätt som plasten. Vid en högre "severity" så bryts de ner allra mest. Vid en lägre "severity" så bryts organiska föreningar endast ner delvis och riskerar att inte brytas ner alls, beroende på hur stabila de är och beroende på hur låg "severity" det är. Det kan även bildas en del nya organiska molekyler i processen som kan klassas som "risk-ämnen", exempelvis PAH:er. Dessa molekyler hamnar oftast i tjära eller koks som lämpligtvis bränns upp. De organiska riskämnena som eventuellt är kvar i oljan när den går vidare till en plastproduktion kommer att brytas ner ytterligare i efterföljande cracker, som är en pyrolysisprocess med en väldigt hög "severity".

Övriga grundämnen riskerar att hamna i oljan eller i någon av biprodukterna eller processavfallet. De ämnen som innebär störst risk är halogenerna (exempelvis Cl, F, Br) som riskerar att bilda dioxinliknande föreningar eller andra halogenerade organiska föreningar. Dessa kan i så fall hamna i oljan, vilket medför att den behöver renas från halogener i ett senare steg. Halogenerna kan även bilda de gasformiga syrorna väteklorid, vätefluorid och vätebromid, som lättast tas om hand i en rökgasskrubber där de kan bindas till exempelvis kalk. Det finns också risk att halogenerna kontaminerar den fasta resten (koks), vilket medför att halogenerna går till förbränning. I en förbränning hanteras halogenerna på samma sätt som sker i dagens energiåtervinning av restavfall. Kalk kan även tillsättas i pyrolysisreaktorn för att fånga upp halogenerna redan där. Vilken teknik som är lämpligast för att fånga halogenerna är inte helt utrett i den här studien, men det är helt klart att det inte är önskvärt att ha dem kvar i produkten (oljan) som säljs då de skulle störa efterföljande processer. Lättast är att sortera och tvätta bort så mycket oönskat material som möjligt innan materialet stoppas in i pyrolysisreaktorn.

4.5.6 Fördelar⁶⁸

- Kan hantera en stor del av den plast som inte återvinns mekaniskt.
- Produkten (oljan) passar in i befintliga processer för fossil olja.
- Om pyrolysoljan renas så kan den användas för att producera ny plast med samma kvalitet som från fossil råvara.
- Den höga temperaturen kan användas för att bryta ner organiska riskämnena.
- Tekniken har hög "technology readiness level" (TRL).

4.5.7 Nackdelar⁶⁹

- Energikrävande process.
- Komplex sammansättning av oljan, som måste gå igenom ytterligare steg för att isolera användbara molekyler.
- Betydande förluster om plasten ska återvinnas tillbaka till plast igen.
- Kräver en förutsägbar sammansättning på plastavfallet.
- Osäkert hur hög inblandningsgrad som går att ha av pyrolysolja i en process som är anpassad för fossil nafta.
- Den återvunna produkten blir dyrare än motsvarande produkt från fossil råvara med dagens styrmedel.

⁶⁸ Hann & Connock 2020

⁶⁹ Hann & Connock 2020

4.5.8 Pågående initiativ

Plastic Energy⁷⁰ (pyrolysis) har två anläggningar i drift i halvstor skala i Spanien. Den första anläggningen startades 2015 i Almeria och den har en kapacitet på 15 ton plastavfall per dygn. Det var enligt Plastic Energy den första anläggningen i Europa som registrerade sin produkt (pyrolysolja) enligt REACH. När de sedan konstruerade den andra anläggningen i Sevilla så hade de lärt sig en del och gjorde en del processförbättringar, enligt Plastic Energy. Båda anläggningarna har en kapacitet på 15 ton plastavfall per dygn eller ca 5000 ton plastavfall per år. De planerar för att bygga ut kapaciteten i Sevilla till år 2022. Båda anläggningarna körs kontinuerligt dygnet runt och 330 dagar per år.

Huvudprodukten från Plastic Energys anläggningar i Spanien heter TACOIL (Thermal Anaerobic Conversion Oil) som sägs vara naftaliknande eller i alla fall att den kan ersätta nafta. Plastic Energy har ett nära samarbete med BASF. Den naftaliknande oljan har använts i BASF:s stora anläggning i Ludwigshafen i Tyskland som feedstock.

Plastic Energy har beslutade investeringar med Ineos, Sabic, Total och Petronas. De har också samarbeten med andra partners som inte har kommit lika långt.

- **INEOS** och Plastic Energy har 2020 undertecknat ett avtal att anlägga en produktionsanläggning som planeras att tas i drift i slutet av 2023. Ineos säger att de ska ta hela produktionen av TACOIL som produceras och omvandla den i flera av sina anläggningar till produkter och producera jungfrulig plast som går till bland annat medicinska produkter, lättviktsdelar till bilindustrin och vattenrör.⁷¹
- **Sabic**, Saudiarabiens oljebolag, har ett avtal om en pyrolysanläggning som planeras att tas i drift 2022 i Geleen i Nederländerna. Det är Plastic Energy som kommer att bygga anläggningen och Sabic som kommer att använda produkten (TACOIL). Anläggningen är på 20 000 ton plastavfall per år.⁷²
- **Total** och Plastic Energy har ett avtal om en anläggning i Frankrike som kommer att bli den första anläggningen för kemisk återvinning av plastavfall i Frankrike. Anläggningen är på 15 000 ton plastavfall per år.⁷³
- **Petronas** och Plastic Energy har skrivit kontrakt och beslutat att bygga en anläggning i Malaysia. Beslutet togs Q2 2019 med planerad uppstart 2023. Anläggningen blir Plastic Energys pyrolysanläggning. Vi har ingen siffra på vilken storlek anläggningen kommer att ha. Petronas är ett av de stora olje- och kemiföretagen i Sydostasien. Petronas tänker, enligt pressmeddelandet, att låta TACOIL:en gå in i deras produktion och ersätta fossila råvaror.⁷⁴

I ett annat samarbete har **INEOS Styrolution, Trinseo och Agilyx** aviserat att de planerar en processanläggning med kapacitet på 18 000 ton/år (50 ton/dag) för PS-avfall med start 2023 i Wingles i Frankrike. Processen benämns som depolymerisering av styren-avfall, men

⁷⁰ Ragot, C. Personlig kommunikation. Oktober 2020.

⁷¹ INEOS 2020

⁷² Barrett 2019

⁷³ Plastic Energy 2020

⁷⁴ Plastic Energy 2019

klassificeras här som pyrolys då det rör sig om en termisk krackning i likhet med övriga pyrolyprocesser. Processtemperaturen är i området 300–600 °C och produkten är flytande styren som kan återanvändas till PS-produkter även med livsmedelskontakt. Utbytet av den monomera produkten rapporteras vara 70–80 % och anges vara lätt att rena då den är flytande.⁷⁵

Fuenix⁷⁶ (pyrolys) har sedan augusti 2018 en pyrolysanläggning i drift, i semiindustriell skala. Kapaciteten är ca 400 kg plastavfall per timme. Fuenix kallar detta ”line 1”. Den körs nu 24/5, det vill säga 24 timmar om dagen och 5 dagar i veckan. Slutprodukterna som kommer ut ur Fuenix process beror på vad de kör in i processen. Typiska värden är 10–15 % vax, 20–25 % tung nafta och 30–40 % lätt nafta. De har kunder för paraffin-produkten som går till Europas största ljusstillverkare. Vad det gäller den naftaliknande produkten så arbetar de med Dow och Neste.

Fuenix vill ha cirkulära råvaror till sin process och vill ha huvudsakligen polyolefiner. De har en försorterad feedstock enligt en standard som heter EWC 191204. De sorterar bort glas, metaller, stenar, ABS/PVC/PS/PMMA/PC. De ser också till att få en lagom storlek på det som ska köras in i processen. Det görs genom ett malningssteg i en kvarn. Efter kvarnen så kommer ett separationssteg, ”windshifting”, där materialet separeras på storlek och vikt. De flesta föroreningarna och det som inte är önskvärt in i processen tas bort i detta steg.

Konverteringsdelen består av två sektioner, Thermolyse och Thermosynthese.

I det första steget, Thermolyse, bryts plastavfallet ner i en ugn vid en temperatur på 500–900 °C till främst mindre linjära kedjor. Det sker olika sorters nedbrytningar och nya reaktioner. Huvuddelen av askan som bildas transporteras direkt och gravimetriskt ner till den nästa ugnssektionen, Thermosynthese. Här sker omvandling av huvuddelen av askan till syntesgas med hjälp av ånga. Innan kondensering så är produkter i gasfas. Klorider bildas i processen på grund av saltinnehållande matrester i avfallet och till viss del på grund av PVC. Dessa klorider tas om hand genom att gaserna får reagera med kalciumkarbonat (CaCO₃). Kloriderna bildar då kalciumklorid (CaCl₂) som är en harmlös produkt i fast form. Bottenaskan från Thermosynthese-sektionen matas ut och levereras till ett avfallsföretag. Denna aska innehåller mest metaller (nonferrous metals, det vill säga metaller förutom järn) och kalciumklorid/kalciumkarbonat. Gasen från processen passerar genom en cyklon, som separerar de fasta partiklarna. De fasta partiklarna återförs till Thermosynthese-ugnen. De renade gaserna transporteras till destillationsdelen där slutprodukterna separeras ut; vax, tung nafta och lätt nafta. De överblivna gaserna, som inte kondenserar, används för att göra elektricitet i en gasgenerator.

Fuenix planerar en andra lina i Weert i Nederländerna. Det är där de har sin existerande produktion. Lina 2 planeras att tas i drift 2022. Det finns planer för storskaliga anläggningar med planerad start efter 2023. Detta planerar de att göra tillsammans med strategiska partners (2023–2030). De talar om en årskapacitet på 500 000 ton av premium-produkter (nafta, paraffin och gasol).

⁷⁵ Tudball 2020

⁷⁶ Mellema, S. Personlig kommunikation. December 2020.

Neste⁷⁷ (främst pyrolys, teknikleverantör och nyttiggörare kombinerat) jobbar med flera teknikleverantörer, mest inom pyrolys. De har stora planer för framtiden men har inget i drift än. Nestes mål⁷⁸ är att varje år processa 1 miljon ton plastavfall till år 2030. Neste har samarbete med flera teknikleverantörer. Nestes idé är, enligt vår intervju, att av plastavfallet göra en förvätskad olja. Denna olja kan sedan gå in som feedstock till deras oljeraffinaderier. Därigenom får de hela friheten att göra alla de produkter som kommer ut ur raffinaderiet på samma sätt som när man har fossil olja som feedstock, det vill säga plaster, kemikalier, mellanprodukter, bränslen med mera.

När det gäller plastavfall som ska gå in som feedstock, så fokuserar Neste på PCR-förpackningar (Post Consumer Recycled) samt på EPR-strömmar (Extended Producer Responsibility). Beroende på lokala förhållanden så kan detta vara olika. Det annonserades 2018 ett samarbete med Licella vad det gäller forskning om solvolys/HTL av plast (se kapitel 1.1.1).

ReOil process OMV Österrike⁷⁹ Sedan 2018 finns en pilotanläggning i Schwechat utanför Wien för att omvandla postkonsumentplast (PE, PP och PS) med en kapacitet på 100 kg/h, vilket skulle motsvara 800 ton per år om man kör kontinuerligt. Förbehandlad postkonsumentplast (PE, PP och PS) smälts och blandas med en förvärmad oljefraktion som löser plasten och värms sedan till 400 °C. Plasten bryts ned till oljeliknade produkter som destilleras och ger ett utbyte på 80 vikt% (ca 100 liter oljeprodukt per timme). Oljeprodukten vidarebehandlas sedan till användbara oljefraktioner på Schwechats raffinaderi till bränsleprodukter eller kemikalier för plastindustrin. ReOil®-processen är baserad på termisk krackning (pyrolys), där långkedjiga kolväten krackas till lättare kolväten med kort kedja. Idag är demonstrationsanläggning under utbyggnad för en planerad kapacitet på 16 000–20 000 ton plastavfall per år (klar 2022) och till 2025 planeras en fullskalig industriellanläggning vara på plats. Denna process ger en ”closed-loop-process” för uttjänta plastprodukter från konsumentplast.

Borealis⁸⁰ (främst pyrolys, teknikleverantör och nyttiggörare kombinerat) har en studie som pågår för att bygga ett plastreturraffinaderi i Stenungsund. Inga investeringsbeslut är tagna. Det är hemligt vilken teknikleverantör som kommer att väljas, men de är öppna med att det är en anläggning med pyrolysteknik. De siktar på en anläggning i storleksordningen 50 000 ton produkt per år, där produkten är nafta. De ämnar ersätta delar av den fossila nafta som idag används mot denna pyrolysbaserade nafta. Idag har Borealis i Stenungsund flera olika crackers som är inriktade på olika råvaror (feedstock) så som etan, propan, butan eller nafta. De ugnar som är optimerade för att gå på nafta passar därför bra för att byta ut en del av den fossila naftan mot pyrolysbaserad nafta.

Den pågående studien tittar på vilket plastavfall som passar och är önskvärt att använda. Det handlar om både tillgång och vad tekniken kräver. Enligt intervjun så är det blandade plastströmmar som idag går till förbränning som det planeras för, från både industriella källor och från privatkonsumenter. Det är huvudsakligen PE och PP, men man accepterar inblandning av

⁷⁷ Teras, O. & Helin, M. Personlig kommunikation. November.2020

⁷⁸ Neste u.å.

⁷⁹ OMV 2020

⁸⁰ Fröberg, A. Personlig kommunikation. November 2020

annat plastavfall. I vilken grad sådan inblandning kan ske får den pågående studien visa. Möjlig uppstart för den pyrolysanläggning som de tittar på är år 2024.

Borealis tittar på ytterligare tekniker, där projektet som beskrivs ovan är ett första steg. Även förgasning är intressant då det kan hantera även annat avfall och biomassa. Tekniken behöver utvecklas mer och kräver större investeringar. Borealis tittar även på till exempel GoBiGas 1, som redan är byggt, men anläggningen ligger nu i ”malpåse”. De tittar nu på möjligheten att utnyttja den anläggningen som ett plastreturaffineri.

Quantafuel⁸¹ (pyrolys) har en pyrolysanläggning i Skive, Danmark. Den består av en ”standard” pyrolysdel följt av en reaktor som har en katalysator. I denna reaktor (Quantafuel reactor) sker en uppgradering där mängden olefiner och aromater reduceras med hjälp av en katalysator. De tar också bort bland annat klor, svavel och fukt innan slutprodukten formas. Enligt Quantafuel får de ett bättre utbyte och en stabilisering av den naftaliknande produkten genom sin unika katalysatorlösning. Katalysatorn kommer från Malmö i Sverige. Anläggningen i Skive har en kapacitet på 20 000 ton plastavfall per år. Anläggningen startade sin produktion 8 sep 2020 och de är fortfarande (november 2020), vad vi förstår, under intrimning och uppskalning. Det som används som råvara är blandat plastavfall från bland annat Grön punkt i Norge och från Danmark. Det är främst PE, PP och PS. Det sker en försortering där huvuddelen av PVC, PET och PA tas bort.

Quantafuel har ett strategiskt samarbete med BASF, som kommer att ta naftaliknande pyrolysolja från Skive som feedstock till sina kemianläggningar. De har också planer på att tillsammans med Vitol bygga två anläggningar⁸², en i Antwerpen och en i Amsterdam, vardera på 100 000 ton plastavfall per år med Quantafuels teknologi. Inget investeringsbeslut är taget vad vi vet.

BASF⁸³ nyttjar det som kommer ut från en anläggning för kemisk återvinning som en ny råvara för kemiska produkter som plaster, medicinska produkter, textilier med mera. I dagens läge använder BASF relativt små sådana volymer eftersom teknologin befinner sig i uppbyggnadsskede. De säger att under den kemiska återvinningsprocessen så förstörs alla strukturer som hör till plasten, vilket även inkluderar additiver och farliga kemikalier som kan klassas som ”substances of concern”. Pyrolysoljan behandlas och renas och transporteras till BASF:s anläggningar. Slutprodukten blir en olja som är jämförbar med jungfrulig fossil olja (utan att vara det). BASF vill inte ha in halogener och andra främmande ämnen i sina existerande processer bland annat av korrosionsskäl. Därför måste dessa tas om hand innan. Andelen återvunnet material i slutprodukterna fördelas enligt massbalansprincipen. Denna certifieras av tredje part. Slutprodukterna får exakt samma egenskaper och kvalitet som de som producerats med fossil råvara.

⁸¹ Quantafuel 2020

⁸² Quantafuel 2020

⁸³ Backes, R. Personlig kommunikation. Oktober 2020.

4.6 Förgasning

Förgasning är en termisk process som sker ihop med syre, en kontrollerad och begränsad mängd syre som innebär att materialet inte riktigt förbränns. Förgasningsprocesser drivs ofta i temperaturer omkring 700 °C och uppåt. Temperaturen i kombination med tillgången på (begränsad mängd) syre bryter sönder organiska molekyler (till exempel plast) till en syntesgas bestående av kolmonoxid (CO) och vätgas (H₂) och en liten del av de lättaste kolvätena så som metan (CH₄) och eten (C₂H₄). Syntesgasen kan därefter antingen förbrännas som den är i en effektivare och renare förbränning, eller användas för att syntetisera nya kemikalier till exempel i form av olika kolväten.

4.6.1 Allmän teknologibeskrivning

Vid höga temperaturer bryts polymermolekyler (och andra organiska molekyler) ner till mindre beståndsdelar i en pyrolysisprocess, likt det som beskrivs ovan. Pyrolysgaserna oxideras av det syre som är med i förgasningsprocessen och bildar koldioxid (CO₂), kolmonoxid (CO), vatten (H₂O) och ytterligare värme som driver processen. Dessa komponenter kommer sedan reagera vidare med varandra och med pyrolysgasen, oljan, tjäran och det koks som bildas i pyrolysen, vilket det går att läsa mer om i litteraturen⁸⁴. Slutprodukten blir huvudsakligen CO och H₂, ihop med några lättare kolväten.

Eftersom molekylerna bryts ner till betydligt mindre beståndsdelar så blir det lättare att hantera diverse orenheter än vad det är i en pyrolysisprocess med låg ”severity”. Alla orenheter går att fånga upp i kemiska eller fysiska processer efter själva förgasningen. Det är alltså ett betydligt lägre krav på renhet av det ingående materialet jämfört med de krav som exempelvis ses i en pyrolysisprocess. Om målet är att förbränna syntesgasen så är det enklast att ta in syre i processen genom att använda luft (21 % syre, 78 % kväve). Om målet däremot är att återvinna materialet genom att producera andra molekyler från syntesgasen så blir det lättare om syntesgasen inte behöver renas från kväve först. Då är det lämpligare att använda ren syrgas, eller någon form av syrebärare exempelvis i form av oxider i eventuellt bäddmaterial. Det kan också vara nödvändigt att introducera väte i form av vattenånga eller vätgas i processen för att få rätt balans mellan H₂ och CO, vilket också påskyndar förgasningen av koks i processen. Kontakt med katalytiskt material kan också påskynda eller på annat sätt förbättra processen.⁸⁵

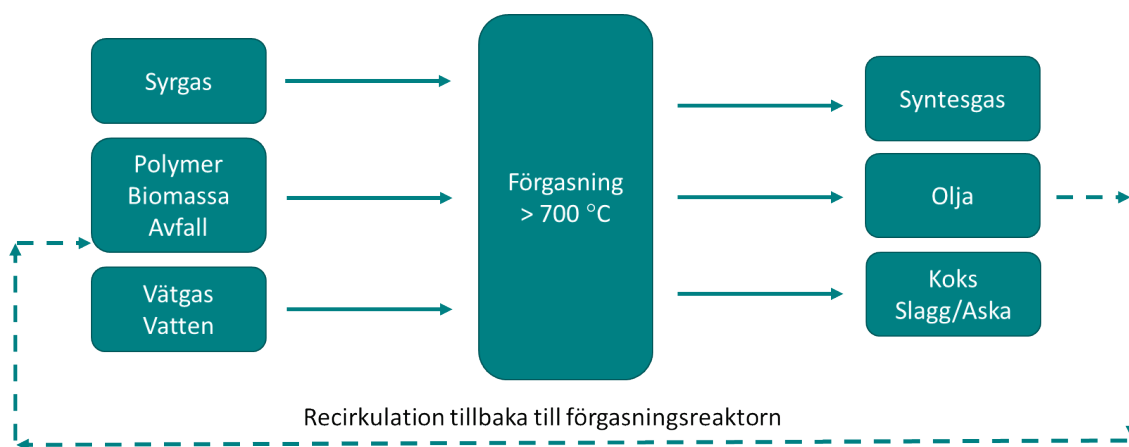
Om vätgas används i processen, istället för vattenånga, så kan en större andel av avfallet omvandlas till produkt, eftersom vätgasen bidrar med en del av den energi som krävs för att driva processen. Om vattenånga används istället så kommer en större andel av kolatomerna behöva omvandlas till koldioxid för att skapa tillräckligt med värme för att driva processen. En process för förgasning av blandat avfall för att producera olja kan se ut ungefär enligt följande (illustreras i Figur 5).

Först sorteras och mals avfallet för att få bort större mängder obrännbart material i form av exempelvis glas, stenar och metall. Det medför också att materialet finfördelas så att det reagerar snabbare i processen. Det steget är inte nödvändigt i alla förgasningsprocesser, men definitivt lämpligt om materialet ska in i en fluidiserad bädd. Materialet matas sedan in i processen på ett

⁸⁴ Kumar et al. 2009

⁸⁵ Berdugo Vilches et al. 2016

sätt som medför att så lite luft som möjligt följer med in i reaktorn, antingen genom att materialet pressas samman för att tränga bort luft, eller genom att den matas in genom en gas som saknar reaktivt syre (exempelvis recirkulerad CO₂). Materialet hettas upp till en temperatur över 700 °C, exakt hur högt varierar från process till process, vilket sönderdelar de organiska molekylerna i mindre molekyler och en oxidationsprocess sätter igång vilket skapar mer värme som håller igång processen. Om det inte bildas tillräckligt med värme i processen (exempelvis i en dubbelbäddsförgasare) så får det tillföras ytterligare värme utifrån. En lämplig dos vattenånga eller vätgas sprutas också in i förgasningsreaktorn, vilket får reagera ihop med övrigt material. Gasen som kommer ut från processen går igenom ett flertal reningssteg för att ta bort oljor, partiklar, alkalimetaller, klor, fluor, brom, svavel och andra oönskade komponenter. Eventuellt brännbara komponenter kan återföras till förgasningsreaktorn för att brytas ner ytterligare. Den rena syntesgasen (CO, H₂) förs sedan vidare för att syntetiseras till någon önskvärd produkt.



Figur 5. Generellt processschema för återvinning genom förgasning. Streckade detaljer är flöden som kan finnas, men inte är nödvändiga för en förgasningsprocess.

4.6.2 Ingående plastavfallsströmmar/polymerer

En förgasningsprocess kan hantera, i princip, nästan vilket material som helst, inte enbart plast. Allt brännbart material går att förgasa. Precis som i en förbränningspanna så skapar olika material mer eller mindre problem som måste hanteras. Klor, särskilt i kombination med kalium, orsakar korrosion. Alkalimetaller kan orsaka att eventuellt bäddmaterial lättare smälter samman, agglomererar. Glas i avfallet kan också smälta samman och orsaka problem, inte bara i en fluidiserad bädd. Det inkluderar även glas från glasfiberarmerad plast. Svavel, klor, fluor, brom, kvicksilver och andra volatila ämnen måste renas bort från den utgående gasen. Dessa orenheter är hanterbara, men de skapar problem som måste hanteras i form av underhåll och efterbehandling, vilket kostar pengar. Värst är om orenheterna varierar mycket över tid, i oförutsägbara intervall.

4.6.3 Material och kemikalieanvändning

För att kunna återvinna avfall till nya kemikalier så behövs det antingen ren syrgas eller ett syrebärande bäddmaterial. En eventuell syrgas konsumeras i processen och ett eventuellt syrebärande bäddmaterial kommer efter hand behöva förnyas. Om processen baseras på en fluidiserad bädd så behöver bäddmaterialet förnyas, oavsett om det är syrebärande eller ej.

Vattenånga eller vätgas är lämpligt att tillsätta i processen, särskilt om produkten ska bli någon form av kolväte. Det är också möjligt att använda katalytiska material i själva förgasningen och det kommer behövas i de senare stegen där syntesgasen omvandlas till andra produkter. Det är oklart vilka katalytiska material som kommer användas eller hur snabbt de behöver bytas ut, vilket antagligen kommer variera från en process till en annan. Det kommer också behövas material och kemikalier för att hantera de orenheter som följer med syntesgasen ut ur förgasaren. Detaljerna kring detta från de intervjuade aktörerna är sparsamma förutom att det exempelvis kan behövas kalk för att neutralisera sura rökgaser.

4.6.4 Produkter och biprodukter/processavfall

Den exakta produkten kan anpassas efter vad som efterfrågas. Syntesgasen kan exempelvis omvandlas till metan (CH_4), metanol (CH_3OH) och många andra produkter. En produkt som består av små och korta molekyler är ofta önskvärt eftersom det går åt ytterligare energi för att bygga upp längre och större molekyler. Det går till exempel att omvandla metanol till olefiner, såsom eten och propen, genom den så kallade MTO-processen (methanol to olefins). Olefiner som eten och propen är grundstenarna för att tillverka de vanligaste plastsorterna. Det finns MTO-anläggningar som drivs i kommersiell skala bland annat i Kina⁸⁶.

En större andel biomaterial i det ingående avfallet resulterar i en större andel förnyelsebar råvara i den utgående produkten. En större andel plast i det ingående avfallet resulterar i en större andel återvunnen råvara i den utgående produkten. Både förnyelsebart och återvunnet är mer eller mindre eftertraktat, men inte alltid av samma kunder och inte alltid till samma pris. Utifrån våra intervjuer har vi sett att förnyelsebar råvara är mer eftertraktad som bränsle, medan återvunnen råvara är mer eftertraktad inom plast- och kemiindustrin. Det är troligtvis en effekt av de styrmedel som finns på de respektive marknaderna och den efterfrågan som konsumenterna har.

Det koks (och eventuellt tjära) som bildas i processen kan antingen brännas upp som en del av uppvärmningen av processen (vilket exempelvis görs i dubbelbäddsförgasare) eller så tas det om hand ihop med det slagg (aska) som bildas i processen. Andelen koks i slagget är så pass lågt att det är tveksamt om det är värt att bränna upp det. Om processen har en fluidiserad bädd så matas sanden ut ihop med slagg (aska) och koks vilket därmed får hanteras ihop.

Allt katalytiskt material kommer efter hand att förbrukas och behöver tas om hand som ett fast avfall. Det kommer också att skapas en del fasta restprodukter från försorteringen av avfallet. Metall från sorteringen borde lämpligtvis gå till återvinning. Glas, stenar och annat övrigt inert material borde deponeras eller användas som konstruktionsmaterial. Vatten och eventuellt annat material från reningen av gasen måste renas i en vattenreningsanläggning eller tas om hand på annat lämpligt sätt.

Från en förgasningsprocess där ren syrgas eller syrebärande material används, istället för luft, så kommer rökgaserna ha en betydligt högre koncentration av CO_2 än vid en förbränning med luft, på grund av allt kväve i luften. Mängden rökgaser och därmed också mängden CO_2 kommer dock att vara betydligt lägre vid förgasning än vid förbränning eftersom en stor del av materialet

⁸⁶ Gogate 2019

omvandlas till produkt istället. Den högre koncentrationen av CO₂ kan underlätta för en eventuell koldioxidinfångning (CCS/CCU).

4.6.5 Processen och "risk-ämnen" (substances of concern)

Så gott som alla ämnen bryts ner i en förgasningsprocess. De delar som inte bestod av kol, väte eller syre kommer att antingen renas bort när syntesgasen renas, eller så kommer de hamna i den fasta delen som består av slagg och koks.

4.6.6 Fördelar

- Kan hantera nästan vilket brännbart avfall som helst, inklusive en stor del av de sorteringsrester och annat restmaterial som kommer från flera av de andra teknikerna för kemisk och mekanisk återvinning.
- Produkten kan anpassas för att passa in i befintliga processer för kemi-/bränsleindustrin.
- Om produkten (metanol) omvandlas till olefiner så kan den användas för att producera ny plast med samma kvalitet som från fossil råvara.
- Den höga temperaturen kan användas för att bryta ner organiska riskämnen.
- Oorganiska ämnen (annat än C, H, O) kan renas bort från syntesgasen, eller som slagg.

4.6.7 Nackdelar

- Energikrävande process, mer energikrävande än pyrolys.
- Betydande förluster om plasten ska återvinnas tillbaka till plast igen.
- Stor investeringskostnad vilket gör att man behöver en större anläggning för att få ihop ekonomin.
- Den återvunna produkten blir dyrare än motsvarande produkt från fossil råvara.
- Osäkert vilken "technology readiness level" (TRL) tekniken ligger på, men lägre TRL än för pyrolys.

4.6.8 Pågående initiativ

Enerkem⁸⁷ (förgasning) har sedan 2015 en kommersiell demoanläggning i Edmonton, Alberta, Kanada. Den har en kapacitet på cirka 50 000 ton metanol årligen. Anläggningen har 2017 byggts till med en anläggningsdel som omvandlar metanol till etanol. Anläggningen går på blandat hushållsavfall. Det består av ca 50 % plastavfall och resten biomaterial från hushållsavfallet. Detta hushållsavfall i Edmonton gick tidigare till deponi. De har ett långt avtal med de lokala myndigheterna att få ta detta avfall. Etanolen som produceras i Edmonton går huvudsakligen till fordonbränsle. Styrmedlen styr dit då det kan säljas som (delvis) förnyelsebart bränsle.

Vad det gäller materialet som kan matas in i förgasningsanläggningen så säger Enerkem att de kan mata in det mesta; biomassa, plastavfall och det mesta som innehåller kolatomer. En fördel med att använda avfall är att det finns en så kallad "tipping fee" eller "gate fee". Enerkem får alltså betalt för att ta emot avfall. De säger att de kan ta in alla plaster, även PET (som innehåller syre), PVC (som innehåller klor) och teflon (som innehåller fluor). Plasterna med klor och fluor ger dock en ökad reningskostnad för rökgasreningen. Plaster med alla sorters additiver är möjliga. Det är önskvärt att sortera ut metaller, glas, stenar och annat som ger mycket aska innan förgasningen.

⁸⁷ Nieuwenhuizen, P. Personlig kommunikation. Oktober 2020.

Enerkem har planer på att kunna leverera sin teknologi till en planerad anläggning i Montreal, Kanada och till Rotterdam, Nederländerna.

- **Montreal:** En större anläggning har annonserats⁸⁸. Det är en anläggning med enkellina (one-train) som kan producera metanol, men också etanol och fordonsbränsle som möjliga produkter. Anläggningen kommer att omvandla 200 000 ton av icke återvinningsbart avfall och skogsrester till en årlig produktion av 125 000 ton av biobränsle. Anläggningen kommer mest att ha biomassa som råvara men också blanda in blandat kommunalt avfall (restavfall). Det behövs stöd från regeringen. Det är ett konsortium som ska ta det finansiella beslutet att investera, som består av Shell, Suncor and Proman, med stöd från Quebecs och Kanadas regeringar. Anläggningen beräknas att vara i drift 2024. Anläggningen i Montreal ska producera drivmedel som ska gå till den kanadensiska eller amerikanska marknaden. Styrmedlen driver att det är just för förnyelsebara drivmedel som man kan få ekonomi i anläggningarna.
- **Rotterdam:** Ett konsortium har under några år jobbat för att få till en förgasningsanläggning med Enerkems teknologi i Rotterdam. Anläggningen har dubbla linor och kommer enligt Enerkem att kosta 450–500 miljoner Euros. Anläggningen är gjord för att producera 230 000 ton metanol per år. Råmaterialet till anläggningen planeras att vara 230 000 ton avfall (omräknat till torrt avfall). För att öka kol-utbytet och för att få en effektiv anläggning, så kommer det tillsättas vätgas i processen. Genom att göra så, så räknar de med ett kol-utbyte på över 70 %, vilket betyder att mer än 70 % av kolatomerna i avfallet omvandlas till metanol. Det behövs stöd från regeringen. Det är ett konsortium som kommer att ta det finansiella beslutet, inklusive Shell och Nouryon. Inget investeringsbeslut är taget. De hoppas på ett investeringsbeslut under Q1 2021. I så fall kan anläggningen vara i drift 2023. Anläggningen ska producera metanol från en råvara av blandat avfall. Det betyder att deras råvara, feedstock, kommer att ha en del som kommer från biomassa och en del som kommer från plastavfall. Plastavfallet är till stor del av fossilt ursprung. Styrmedel och ekonomi leder till att metanolen kommer säljas, enligt massbalansprincipen, på två marknader. Den del av metanolen som kommer från biomassa säljs till bränslemarknaden och den del av metanolen som kommer från plastavfallet säljs till kemiprodukter. Dessa kemiprodukter kan också bli omvandlade till ny plast.

Nouryon⁸⁹ är engagerade i Rotterdam-projektet tillsammans med Enerkem med flera för att få till en förgasningsanläggning i Rotterdam. Nouryon säger att deras roll vad det gäller kemisk återvinning av plast ligger främst i:

- Vätgas och cirkulärt kol
- Metanol som de använder mycket av
- Användning till kemiprodukter som till exempel ättiksyra och formaldehyd
- Intresserade av biogent och återvunnet kol, beroende på incitamenten som finns för förnybart bränsle och i andra marknader
- Metanol och etanol till bränsle

⁸⁸ Enerkem 2020

⁸⁹ van Loon, M. Personlig kommunikation. Oktober 2020.

Generellt vad det gäller kvaliteten på det som kommer från en kemisk återvinningsanläggning så ska den ha samma specifikation som dagens råvara. Går den till fordonsbränsle så måste den klara den gällande specifikationen. Produkterna får inte ha någon avvikande lukt. Kunderna till Nouryon vill gärna ha återvunnet material, men vill ha någon form av standard. De tänker sig att använda den återvunna metanolen som kommer ut från den kemiska återvinningsanläggningen som drop-in till dagens fossila råvaror in i deras processer. Metanolen som kommer från biomassaandelen går till bränsle, beroende på att det just nu har det högsta värdet.

Chalmers⁹⁰ (förgasning/pyrolys) driver den så kallade Chalmersförgasaren som finns i testbädden, Chalmers kraftcentral. Chalmersförgasaren är en högtemperatur-pyrolysreaktor, vilket innebär att den tekniskt ligger någonstans i gränslandet mellan det vi i den här rapporten har definierat som pyrolys och det vi har definierat som förgasning. Högtemperatur-pyrolysreaktorn har en kapacitet på 2–4 MW, vilket möjliggör pyrolys av ca 5 ton plastavfall per dag.

Tekniken är ett tvåbäddssystem där den ena bädden fungerar som en förbränningsanläggning, vilken har en kapacitet på 12 MW och kan matas med bränsle separat. I den bädden tillförs värmen för pyrolys-processen genom att värma upp ett bäddmaterial. Energin överförs via bäddmaterialet till den andra bädden där pyrolysen av plastmaterialet (eller annat såsom biomassa) omvandlas till gas i ångatmosfär vid 550–850 °C. Det material som inte omvandlas till gas i pyrolysen transporteras med det avkylda bäddmaterialet till den första reaktorn där det fungerar som bränsle för processen. Valet av bäddmaterial i processen gör det möjligt att via katalytiska egenskaper styra produktsammansättningen. Vad man vill få ut som produkter beror dels på kundens önskemål, samtidigt som det görs en ekonomisk bedömning. Det som kan matas in i förgasaren är i princip allt som kan brinna, men bränslet anpassas utifrån vilken produkt som önskas.

Olika bränslen ger olika möjligheter till produktsammansättning, där pyrolys-processen klipper av de kedjorna som finns i de olika råvarorna som matas till processen:

- PE/PP ger raka kedjor och en sammansättning som liknar den som fås vid ångkrackning av fossil nafta, där PP med sina metyl-grupper ger mer metan än PE.
- PET/PS ger aromater, samt syntesgas och metan.
- PVC omvandlas i hög grad till koks, syntesgas och aromater, samt HCl. HCl släpper redan vid 350–400 °C.

Rening av gaserna beror på vad som matas in. Det behövs någon form av absorbent i form av kalk som absorberar svavel/klor och annat, vilka kan matas direkt in i processen eller i efterföljande reningssteg. Reningsutrustning väljs utifrån hur ren gasen ska vara. På frågan om vad som händer med farliga ämnen så svarar Henrik Thunman:

- Ju lägre temperatur desto längre är de kolkedjor som bildas i pyrolysen och ju längre kolkedjor som bildas desto större sannolikhet är det att det följer med andra atomer än kol och väte.
- Dioxiner och liknande kan undvikas genom att inte befinna sig i det temperaturfönstret där de bildas. Alla gaser ska renas ner till tillräckligt låg nivå (ppb) med aktivt kol och andra filter (som sedan förbränns) innan gasen går vidare och förgiftar katalysatorn. De

⁹⁰ Thunmann, H. Personlig kommunikation. November 2020.

förbränns i vanlig förbränning med tillgång till syre i förbränningsdelen av tvåbäddssystemet, vilken kommer att klassas som en avfallsförbränningsanläggning och ska därmed uppfylla de krav som ställs på en sådan.

- Anläggningar av den här typen måste byggas tillräckligt stora för att skapa ekonomi att hålla den personal som krävs för att driva en avfallsförbränningsanläggning, samt investera i reningsutrustning och separationsutrustning som ger tillräckligt stora värdefulla produktströmar. Det är alltså utrustning som har en mycket stort beroende av ”economy of scale”.

GoBiGas 1 är en existerande förgasningsanläggning som är byggd som en demonstrationsanläggning för att producera syntetisk naturgas (SNG) från träråvara. Anläggningen togs i drift 2015. GoBiGas 1 ligger på Hisingen i Göteborg. Den är utvecklad efter tester och studier på Chalmers i den så kallade Chalmersförgasaren. Anläggningen visade sig fungera tekniskt bra⁹¹. I april 2017 beslutade Göteborg Energis ledning och styrelse att aktivt söka efter en ny ägare till anläggningen. Den processen avslutades i mars 2018 då ledningen och styrelsen beslutade att avsluta projektet och avveckla verksamheten⁹². Anläggning ligger därför nu i ”malpåse” sedan 2017, för att vid behov kunna startas igen. Under åren 2017 och framåt så har olika initiativ tagits för att undersöka möjligheten att utnyttja GoBiGas 1 på andra vis, till exempel som ett plastreturaffinaderi, framför allt som två olika projekt (2017) och (2019) med finansiering från det strategiska innovationsprogrammet (SIP) RE:Source.

Under 2020–2021 inom Klimatledande Processindustri, som drivs av Västsvenska Kemi- och Materialklustret, så drivs det ett genomförbarhetsprojekt för att se på möjligheterna att kunna utnyttja GoBiGas 1 som ett plastreturaffinaderi. Projektet heter ”Demonstrationsmöjligheter GoBiGas 1”. Flera stora kemiföretag är med i projektet. Projektet undersöker bland annat möjligheter vad det gäller:

- Behov av ombyggnader
- Råvarubehov
- Slutprodukter
- Ekonomi
- Affärsupplägg och intresserade partners

Tekniken blir en högtemperatur-pyrolys. Slutprodukterna från GoBiGas 1 som man eftersträvar är olefiner (eten och propen) olika aromater. Dessa ”byggstenar” används sedan för att göra plast och/eller kemi-produkter. Den storlek på anläggning som man ser på skulle använda ca 75 000 ton plastavfall per år. Detta är i sammanhanget en stor anläggning. Fördelen med GoBiGas 1 är att anläggningen redan är byggd. Trots att anläggningen behöver modifieras så kan den tas i drift relativt snabbt. Projektet som undersöker möjligheten beräknas att vara klart under Q1 2021.

4.7 CCU – Carbon capture and utilization

Om man tar de termiska processerna, pyrolys och förgasning, ett steg längre och tillsätter en ännu större mängd syre eller luft så sker en förbränning, där plasten omvandlas till koldioxid (CO₂) och vatten (H₂O). Om koldioxiden sedan fångas in och utnyttjas på ett eller annat sätt så kallas det på

⁹¹ Thunman et al. 2017

⁹² Göteborg Energi 2018

engelska för carbon capture and utilization (CCU), vilket kan översättas till kolinfångning (eller koldioxidinfångning) för utnyttjande. Det är inte en teknik som brukar räknas in under kemisk återvinning, men det tas ändå med en beskrivning här eftersom det är en teknik som (precis som de andra) kan få tillbaka kolatomerna i ett kretslopp av kemikalier, plast och andra produkter. Gränsen mellan CCU och kemisk återvinning genom exempelvis förgasning är något diffus.

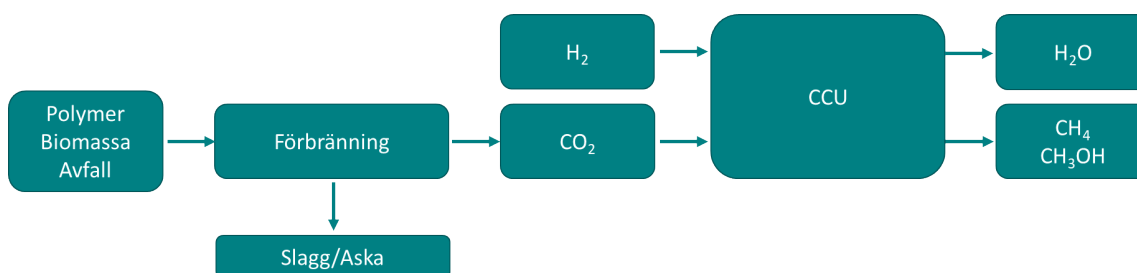
CCU är nära kopplat till CCS (carbon capture and storage, eller carbon capture and sequestration) som innebär att koldioxid (eller kol i någon annan kemisk form) fångas in och lagras för en lång tid framöver så att det inte släpps ut som koldioxid i atmosfären. Skillnaden blir då att vid CCS så tas kolatomerna bort från kretsloppet (som en deponi) men vid CCU så återförs de till det tekniska kretsloppet (som en återvinning) men kommer i slutändan att släppas ut i atmosfären som koldioxid om de inte fångas in igen. Både CCS och CCU kan bidra till att uppnå klimatmålen. I fallet med CCS så tas kolatomerna bort från kretsloppet och bidrar på så sätt inte till någon ökning av mängden CO₂ i atmosfären. Så länge kolatomerna som recirkuleras i en CCU-process ersätter en fossil råvara så kommer även dessa bidra till ett minskat utsläpp av CO₂ genom att varje kolatom som recirkuleras kan användas en extra gång. Att recirkulera kolatomerna via CCU ger alltså en liknande effekt som en recirkulering av kolatomer via mekanisk eller kemisk återvinning. De olika sätten att recirkulera kolatomer (återvinna plast) ger dock olika effekt i form av att de ger olika produkter som ersätts, kräver olika mängd energi och är olika effektiva på att återföra kolatomerna till det tekniska kretsloppet. Dessutom är de anpassade för olika typer av (plast)avfall.

4.7.1 Allmän teknologibeskrivning

Kol(dioxid)infångning kan ske på flera olika sätt. Här nämns, lite kort, några processer där koldioxid kan omvandlas till kolväten som kan återgå till det tekniska kretsloppet som kemikalier, plast eller andra produkter.

Ett sätt att fånga in CO₂ på är genom att låta växter eller alger göra jobbet. Vissa fotosyntetiserande organismer (inte alla) kan växa snabbare i en miljö med ökad CO₂-halt. Sådana förhållanden kan exempelvis skapas i växthus eller algodlingar. Växterna/algerna kan skördas för att exempelvis utvinna olja direkt från växten/algen, eller så kan biomassan omvandlas till olja eller andra kolväten genom en pyrolys- eller förgasningsprocess.

Ett annat sätt är att syntetisera metan (CH₄) eller metanol (CH₃OH) från infångad CO₂ och vätgas (H₂) från exempelvis en elektrolysprocess. Detta kallas ofta för elektrobränslen, eller ”power to gas” (PtG) respektive ”power to liquid” (PtL). Det går också att framställa andra bränslen, även om korta och lätta molekyler är enklare att framställa. Bränslena går också att använda som råvara till kemikalier, plast eller andra produkter. En principskiss för en sådan process är illustrerad i Figur 6.



Figur 6. Generellt processschema för koldioxidinfångning för utnyttjande (CCU) i form av syntetisering av elektrobränslen från vätgas och koldioxid från förbränning av plastavfall.

4.7.2 Ingående plastavfallsströmmar/polymerer

Ingående avfallsströmmar är i det här fallet är koldioxiden, som i sin tur kan komma från exempelvis förbränning av mixat avfall innehållandes plast. Koldioxiden kan också komma från en lång rad andra punktkällor eller från direkt infångning från luft.

4.7.3 Material och kemikalieanvändning

I processen med elektrobränslen så kommer det behövas väte som i så fall kommer från en elektrolysisprocess. Där kommer det behövas en stor mängd elektricitet, rent vatten och en elektrolyt. Det kommer också behövas utrustning för att komprimera gasen och en katalysator för att omvandla väte och koldioxid till önskvärda produkter.

4.7.4 Produkter och biprodukter/processavfall

Produkten i processen med elektrobränslen kommer troligtvis vara metan (CH₄) eller metanol (CH₃OH). Om processen är tänkt att köras på vätgas från elektrolysis av vatten så kan den delen även användas för att stabilisera elnätet, genom att utnyttja överskottsenergi från intermittenta kraftkällor så som vind och sol när de producerar i överflöd, förutsatt att elektrolysen dämpas eller stängs av då det är underskott på elproduktion. Det kan alltså skapa flexibilitet på användarsidan i elnätet, vilket kan fungera som en produkt.

Bortsett från diverse förbrukningsmaterial så kommer den enda biprodukten vara vatten, som kan recirkuleras tillbaka till elektrolysisprocessen. Det kommer dock förbrukas mer vatten än vad som skickas tillbaka.

4.7.5 Processen och "risk-ämnen" (substances of concern)

Om en CCU-process med syntetisering av elektrobränslen kopplas på efter en förbränning av avfall, inklusive plastavfall, så kommer förbränningen ta hand om alla riskämnen på samma sätt som de gör i dagsläget. Processen med elektrobränslen hanterar inga ämnen utöver det som beskrivs i 4.7.3. Dessa ämnen klassas i det här fallet inte som riskämnen. Processen skapar inte heller några ämnen utöver det som beskrivs i 4.7.4, vilka inte heller klassas som riskämnen i det här fallet.

4.7.6 Fördelar

- Produkten kan anpassas för att passa in i befintliga processer för kemi-/bränsleindustrin.
- Kan kombineras med andra processer som släpper ut koldioxid.
- Kan användas för att skapa flexibilitet på användarsidan i elnätet.

4.7.7 Nackdelar

- Energikrävande process, mer energikrävande än förgasning.
- Den återvunna produkten blir dyrare än motsvarande produkt från fossil råvara.
- Tekniken är inte lämplig för plaståtervinning, men kan kopplas ihop med andra processer för att öka mängden kolväten som recirkuleras.

4.7.8 Pågående initiativ

Endast ett par exempel på CCU-initiativ har tagits med i den här sammanställningen, eftersom det är högst tveksamt om CCU borde klassas som kemisk återvinning.

Carbon Recycling International⁹³ har sedan 2012 en anläggning i Svartsengi, på Island, där koldioxid från ett geotermiskt kraftverk omvandlas till metanol. Till processen används vätgas från elektrolys av vatten. När processen började så producerades det 1300 ton metanol per år, vilket fyra år senare hade ökat till 4000 ton per år genom att processen skalades upp. Det motsvarar en infångning av 5500 ton CO₂ per år. Vätgas och koldioxid komprimeras och bildar, genom en katalysprocess, metanol och vatten som sedan destilleras för att få ut ren metanol.

Samma företag har också drivit ett par pilotanläggningar, i samarbete med ett flertal aktörer. En av dessa pilotanläggningar, i Luleå, har utnyttjat gasen från SSAB:s masugn för att producera ett ton metanol om dagen, som senare utnyttjas som bränsle av Stena Line i Göteborg. En masugn är en form av förgasning, där koks eller annat bränsle omvandlas till CO, CO₂ och en liten del H₂. På projektets webbsida⁹⁴ står det att de använder koldioxiden (CO₂) och vätgasen (H₂) från masugnsgasen, men baserat på vad vi vet om kemisk återvinning av avfall via förgasning så är det inte omöjligt att de även använder kolmonoxid (CO) i processen.

Det har även slutits ett avtal mellan Henan Shuncheng Group och Carbon Recycling International att designa en anläggning i Anyang city i provinsen Henan i Kina. Där ska gaser från kokstillverkning, det vill säga en pyrolys av stenkol, användas för att producera 110 000 ton metanol per år. Processen kommer utnyttja både CO₂ och H₂ från kokstillverkningen. Anläggningen beräknas kosta 90 miljoner USD (ca 800 miljoner SEK) och ska stå klar i slutet av 2021.

Liquid Wind, baserat i Göteborg, har startats för att producera så kallade elektrobränslen, där vätgas från elektrolys av vatten kombineras med koldioxid för att producera metanol. Deras plan är att 2030 ha byggt ett flertal (10+) anläggningar som var och en ska årligen omvandla 70 000 ton CO₂ till 50 000 ton metanol. En första sådan anläggning⁹⁵ ska byggas ihop med Övik Energi i Örnsköldsvik vid kraftvärmeverket Hörneborgsverket där biomassa förbränns för att producera värme, el och ånga. Metanolen är tänkt att användas av sjöfarten som ett koldioxidneutralt bränsle. De har som mål att ta investeringsbeslut i början av 2022 och ha metanolen färdig för försäljning 2024.

⁹³ Carbon Recycling International 2021

⁹⁴ Fresme 2017

⁹⁵ Liquid Wind 2020

Perstorp driver ett projekt kallat Project AIR⁹⁶, där planen är att i Stenungsund starta upp en produktion av metanol från en process baserad på en kombination av förgasning och CCU. Planen är att restprodukter från den egna produktionen ska förgasas ihop med biometan för att producera syntesgas. Syntesgasen och infångad CO₂ från de egna processerna (inklusive förgasningen), ihop med vätgas från elektrolys av vatten, ska omvandlas till metanol. Det är oklart om syntesgas och infångad CO₂ ska omvandlas till metanol i samma process eller om det är två skilda processer. Metanolen kommer användas i den egna produktionen av kemikalier och planen är att med detta projekt ersätta de 200 000 ton fossil metanol per år som Perstorp i dagsläget använder inom Europa. Produktionen av metanol planeras att starta år 2025.

⁹⁶ Perstorp 2020

5 Tillsatsämnen i avfallsströmmar och kemisk återvinning

Plastprodukter består inte endast av polymerer. Vanligt är att optimera plastproduktens egenskaper för produktionsprocessen och i den färdiga slutprodukten med tillsatsämnen. Dessa kan delas in i fyra huvudgrupper:⁹⁷

1. Funktionella tillsatser (stabilisatorer, antistatiska medel, flamskyddsmedel, mjukgörare, smörjmedel, glidmedel, härdare, skumningsmedel, biocider, etc.).
2. Färgämnen (pigment, lösliga azokoloranter etc.).
3. Fyllmedel (glimmer, talk, kaolin, lera, kalciumkarbonat, bariumsulfat).
4. Förstärkningar (till exempel glasfiber, kolfiber).

Hur dessa ämnen beter sig under kemisk återvinning beror på:

- Kemisk struktur: Oorganiska (till exempel metaller och fyllnadsmedel) eller organiska tillsatsämnen (till exempel mjukgörare, flamskyddsmedel och färgämnen).
- Ingående mängd: En större mängd kan påverka till exempel kemin i processen och katalysatorer eller vara inert. Exakt var gränsen går för olika tillsatser är svårt att generalisera.
- Additiv är i de flesta fall inte kemiskt bundet till polymeren. Det finns dock vissa undantag (till exempel polykarbonat, härdplaster).
- Vilken kemisk återvinningsprocess som används, så som låg- eller högtemperaturprocess.

5.1.1 Tillsatsämnen och olika låg-temperaturprocesser

Kemiska återvinningsprocesser som upplösning/utfällning och depolymerisering sker oftast under lägre temperaturer <250 °C. Här kommer tillsatsämnets kemiska och termiska stabilitet bestämma hur ämnet påverkas av processen. Detta medför att tillsatsämnena kan vara helt eller delvis nedbrutna eller helt opåverkade. Under utvecklingen av en återvinningsprocess behöver föroreningsprofil och reaktivitet undersökas för att optimera renhet på slutprodukten.

Upplösning/utfällningsmetoden (<250 °C) är en metod för att minska organiska- och oorganiska föroreningar i kontaminerade plastavfallsströmmar och separera olika polymerer i blandad plast. Plasten och olika komponenter löses upp i olika reaktionssteg tills en ren plastpolymer kan kristalliseras ut. Efter indunstning av lösningsmedel får man en biprodukt av urlakade tillsatsämnen (organiska- och oorganiska föroreningar). Om tillsatsämnena är inerta och alla har oförändrad kemisk struktur så finns det potential för att tillvarata tillsatsämnet som i så fall kan återcirkuleras till nya plastprodukter. I annat fall bör de destrueras med lämplig metod.

Depolymerisering (lågtemperatur-solvolyt <250 °C) är en process för att få en ren slutprodukt av plastens byggsten, det vill säga monomer. Om de plastavfallsströmmar som används är av hög renhet och ofärgade så får man en renare slutprodukt, det vill säga monomer. I kontaminerade och färgade plastavfallsströmmar måste en tvättprocess som ett försteg införas för att lösa ut dessa

⁹⁷ Hahladakis 2018

tillsätsämnen ur plasten. Det är då samtidigt viktigt att plastpolymeren inte får påverkas. Det är till exempel vanligt att alkoholer används för att lösa ut färger och tillsatser i PET-avfall. I denna process får man efter rening av monomeren, till exempel via destillation eller kristallisation, också en biprodukt som består av urlakade tillsätsämnen. Det kan då vara så att tillsätsämnena (oorganiska och organiska) är inerta och alla har oförändrad kemisk struktur och är därmed återvinningsbara, eller att de påverkats kemiskt/termiskt och bildat en ny kemisk förening eller polymer. Till exempel är färgämnen reaktiva under dessa betingelser.

5.1.2 Tillsätsämnen och olika hög-temperaturprocesser

Till hög-temperaturprocesser räknas de termokemiska processerna solvolys, pyrolys och förgasning, som har processtemperaturer mellan 300–1000 °C.

Alla **organiska molekyler** reagerar under dessa betingelser via termisk eller kemisk nedbrytning. Om dessa molekyler innehåller så kallade heteroatomer (till exempel N, O, S, Cl, Br) så sker det troligtvis en klyvning vid heteroatomerna, då dess kemiska bindningar är mer reaktiva och reagerar lättare. Om nedbrytningsprodukter av additiven får en liknade kemisk struktur som den önskade oljeprodukten så ger det inga driftstörningar eller biprodukter som inte kan hanteras. Dock är vissa ämnen som till exempel färgämnen och flamskyddsmedel komplexa och ofta mer reaktiva kemiska föreningar. Sådana ämnen kan ge andra nedbrytningsprodukter som kan störa dessa processer genom deaktivering av katalysatorer och ökad bildning av koks och tjära, eller generera nya farliga ämnen som brom- och klorinnehållande dioxiner.

Oorganiska tillsatser, i form av metaller, kan också påverka till exempel den kemiska processen och deaktivera katalysatorn. Dessa metaller kan finnas som komplexbundna i organiska föreningar, salter eller i metallform. Efter avslutad kemisk reaktion är det viktigt att veta var dessa metaller återfinns, det vill säga i huvud- eller biprodukterna och i vilken kemisk form (grundämne eller joniserad).

5.1.3 Jämförande exempel på de större klasserna av tillsätsämnen och olika kemiska återvinningsprocesser

Mjuktgörare, ftalat (tillsats 10–70 %, används huvudsakligen i PVC) kommer brytas ned till kolväten och aromater i hög-temperaturprocesser och ingå i oljeprodukten. I lågtemperaturprocesser (depolymerisering, upplösning/utfällning) kommer dessa ämnen att återfinnas som biprodukt som kan ge möjlig cirkulär återanvändning till nya plastprodukter, omvandlas till ofarliga kemikalier eller förbränns/deponeras. Om ett tillsätsämne som återvinns är tillståndspliktigt enligt bilaga XIV i REACH behöver återvinnaren söka tillstånd för hanteringen.

Bromerade flamskyddsmedel (tillsats 3–25 %) är samlingsnamnet för ett 70-tal organiska ämnen. Det vanligast förekommande är tetrabrombisfenol A (TBBPA) som är ett av de dominerande i Sverige och EU. Andra vanliga är polybromerade difenyletrar (PBDE) och hexabromcyklododekan (HBCD). Dessa bromerade flamskyddsmedel (organiska) bryts ned i både pyrolys och solvolys men genererar olika biprodukter. Brom bildar i båda processerna vätebromidgas som korroderar utrustningen.

Under **pyrolys** av HIPS och ABS från elektronikplast under en syrefri miljö bryts de bromerade föreningarna ned termiskt och bildar bromerade organiska föreningar och salter som stannar i oljan. Till exempel vid pyrolys av PBDE kunde nedbrytningsprodukter som dioxiner (polybromerade dibensodioxiner, PBDD, och polybromerade dibensofuraner, PBDF) hittas i höga nivåer. Däremot rapporteras TBBPA, som är mer termiskt instabil, att bidra till bromerade fenolderivat som vidare polymeriserar till koks (PAH:er) utan brom- och syreinhåll.⁹⁸ Om brominnehållande plaster ska pyrolyseras behöver plastavfallet förbehandlas eller oljan efterbehandlas för att reducera bromhalterna till acceptabla nivåer, till exempel hydrodebromering.⁹⁹ Alternativt kan brom och andra halogener infångas i själva pyrolyisreaktorn med hjälp av kalktillsats.

Vid **solvolys/HTL** av bromerade flamskyddsmedel från HIPS och ABS från elektronikplast, med superkritiskt vatten som katalyserats med kaliumhydroxid, ser man ett helt annat reaktionsmönster. Här joniseras frisatt brom och överförs till vattenfasen. Vilket medför att oljeprodukten från solvolys har låga nivåer av brom. Det har därför föreslagits i litteraturen att solvolys skulle kunna vara ett sätt att rena kontaminerade plastströmmar.¹⁰⁰

Vid metoderna för **depolymerisering och upplösning/utfällning**, som görs vid lägre temperaturer behöver dessa bromerade flamskyddsmedel lösas ut ur plasten i ett första steg. I dessa processer kan man behöva utveckla kemiska processer för att deaktivera eller recirkulera dessa ämnen beroende på vilka regler som gäller för ämnet enligt REACH.

Isolationsmaterial av EPS och XPS kan innehålla det bromerade flamskyddsmedlet HBCD. Här har CreaSolv® utvecklat ett patenterat lösningsmedelsystem som ska kunna separera HBCD och dess bromerade biprodukter med **upplösning/fällningsmetodik**. Dessa bromerade restprodukter kan sedan omvandlas i en bromåtervinningsanläggning för att generera brom som sedan kan återanvändas till icke klassade bromerade flamskyddsmedel. På detta sätt kan klassade tillsatsämnen säkert destrueras och återanvändas i cirkulära flöden.^{101,102}

5.1.4 Övriga grupper av tillsatsämnen och dess aspekter på kemiska återvinningsprocesser

Fyllmedel och förstärkningar (fibrer) kan effektivt separeras med alla dessa kemiska återvinningstekniker om plastkompositen består av en termoplast. För fiberförstärkta hårdplaster kan glas- och kolfibrer separeras bort med pyrolys och solvolys. I sådana fall kan till exempel kolfiber bidra med en högvärdig produkt ut ur processen. Glasfiber är av mindre värde men det finns ett stort behov att lösa återvinning av dessa ofta långlivade produkter som till exempel båtar och vindturbinblad. Dessa plastprodukter med fiber och fyllnadsmedel har ofta lägre halt polymer då fibrer och fyllnadsmedel är av oorganisk karaktär. Detta betyder att en mindre andel polymer finns för att generera en oljeprodukt. Vid höga temperaturer, så som vid förgasning, så kan

⁹⁸ Ma 2016

⁹⁹ Ma 2016

¹⁰⁰ Wang 2012

¹⁰¹ Schlummer 2017

¹⁰² Wagner 2020

glasfiber smälta och orsaka mekaniska problem i processen i form av agglomeration och liknande.

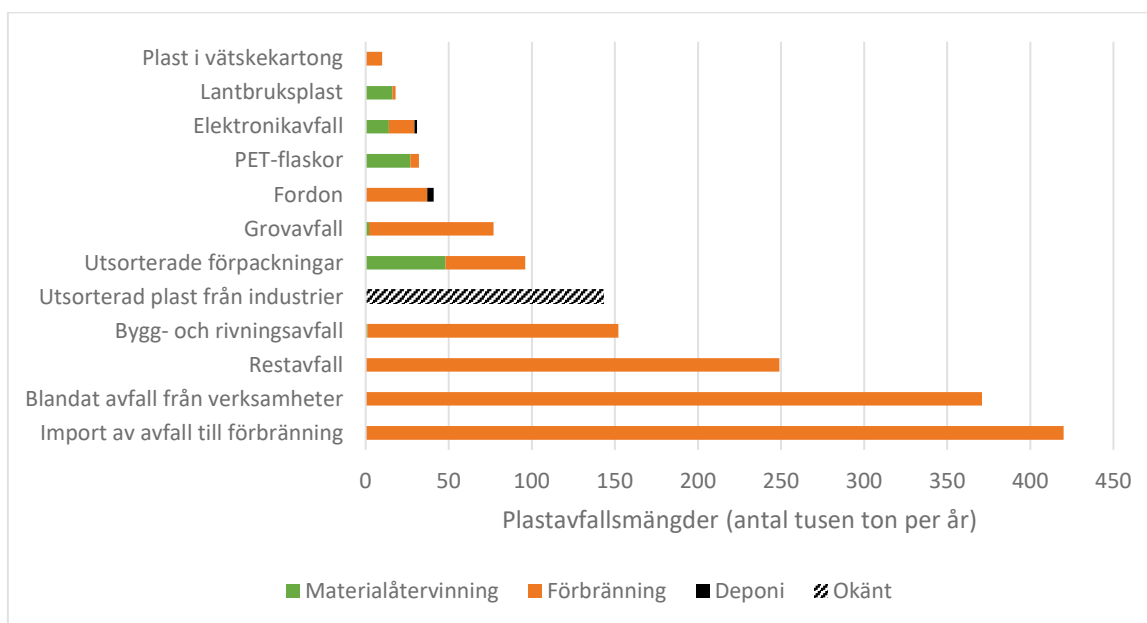
Färgämnen (tillsats 0.25-5 %) består av många olika kemiska grupper och varje polymertyp har specifika färgämnen och infärgningstekniker. Dessutom används en mix av färgämnen som ger den slutgiltiga färgen. I depolymerisering och upplösning/utfällning kommer det vara viktigt att avfärga plasten för att få ut en ofärgad högvärdig slutprodukt, det vill säga polymer och monomer. Restprodukten, det vill säga en blandning av färgämnen, får destrueras eller kemiskt modifieras till nya. I solvolys och pyrolysis kommer dessa att brytas ned och men då de ofta innehåller kväve (N) så kan de orsaka ett högre kväveinnehåll i oljan. Det kvävet behöver avlägsnas innan vidare användning i raffinaderier.

PVC och klorinnehållande tillsatser är mindre lämpliga i högt tempererade processer som pyrolysis. Dessa bildar vid hög temperatur väteklorid i gasform som måste avskiljas för att förhindra bildning av till exempel dioxiner och andra klorerade organiska föreningar. Alternativt kan man förbehandla avfallet med en termisk dehalogenering eller använda sig av olika tillsatser av kalk, som neutraliserar väteklorid under till exempel pyrolysis eller vid malning av avfallet. Om istället solvolys med superkritiskt vatten används får man en fördelaktig separation av klorid som omvandlas till joner och avlägsnas som salter i vattenfasen. På detta sätt kan man undvika biprodukter som klorerade organiska föreningar.

Övriga tillsatser. Högt tempererade processer är en destruktiv metod och alla organiska ämnen kommer att reagera. Hur dessa ämnen beter sig beror på den kemiska sammansättningen. Finns det heteroatomer (N, O, S, Cl, Br) kommer dessa tillsatser reagera snabbare. Här finns risk för andra nedbrytningsprodukter eller reaktioner som inte är önskvärda i den kemiska återvinningsprocessen. Nedbrytningsprodukter kan hamna i gasen, oljan, en eventuell vattenfas eller i den fasta återstoden av koks.

6 Intressanta flöden i det svenska avfallssystemet

En sammanställning av kartlagda plastflöden i Sverige samt dess innehåll kan ge en indikation på vilka plastflöden som skulle kunna vara aktuella för kemisk återvinning. Här kan faktorer som storlek, polymersammansättning, spridning och transportavstånd ha betydelse för dess lämplighet. För att urskilja dessa potentiella flöden används tidigare studier, rapporter, plockanalyser och statistik för plastavfall i Sverige tillsammans med underlag från intervjuer med utvalda aktörer inom sektorn för avfallshantering. Tidigare kartläggningar som utförts på plastflöden i Sverige har gjorts i syfte att hitta lämpliga plastflöden till både mekanisk och kemisk återvinning samt att undvika konkurrens mellan dessa¹⁰³. De plastflöden som idag går till förbränning eller deponi, har en polymersammansättning som matchar krav från tekniker för kemisk återvinning samt innehar geografisk lämplighet kan därför vara intressanta.



Figur 7. Kartlagda plastavfallsflöden i Sverige och sluthantering av avfallet med statistik från år 2016–2017, avrundade mängder, sammanställt från SMED Rapport 01:2020¹⁰⁴ och egna beräkningar baserat på uppgifter från Fiskeby Board¹⁰⁵ och Envir¹⁰⁶.

Figur 7 visar en sammanställning av storleken på de plastflöden som finns i Sverige med underlag från år 2016–2017, statistik från SMED Rapport 2019:01¹⁰⁷. Flödet plast i vätskekartong finns inte med i samma statistik utan har beräknats överslagsmässigt utifrån uppgifter från Fiskeby Board, som tillverkar förpackningskartong från returfiber¹⁰⁸ och Envir AB, som gör plockanalyser

¹⁰³ Ljungkvist Nordin et al. 2019a

¹⁰⁴ Ljungkvist Nordin et al. 2019b

¹⁰⁵ Sundblad, A. Personlig kommunikation. November 2020

¹⁰⁶ Vukicevic, S, Personlig kommunikation, November-december 2020

¹⁰⁷ Ljungkvist Nordin et al. 2019b

¹⁰⁸ Sundblad, A. Personlig kommunikation. November 2020

av avfall¹⁰⁹. För enkelhetens skull har liknande namn på plastflöden samt dess innehåll använts även i denna studie. Potentialen för kemisk återvinning kan därmed utredas för varje flöde för sig. Stapeln blandat avfall från verksamheter innehåller även det importerade plastavfall från verksamheter som går till förbränning med energiåtervinning.

Graden av materialåtervinning som illustreras i Figur 7 motsvarar vad som lämnar en sorteringsanläggning och skickas till tvättning och granulering. Det är en lägre grad än vad som då rapporterades till EU. Den rapporterade mängden plastförpackningar till materialåtervinning, 96 000 ton, motsvaras av hela stapeln ”utsorterade förpackningar”. Det har beslutats inom EU om nya krav på hur materialåtervinning ska mätas. Det kommer innebära att mätpunkten flyttas närmare den faktiska materialåtervinningen. Den nya mätpunkten kommer troligtvis vara just där som illustreras i Figur 7, men den rapporterade mängden kommer troligtvis baseras på en uppskattning av hur mycket som sedan förloras vid tvättning och granulering. Dessa förluster kan variera mycket beroende på hur hög kvalitet sorteringen håller, samt hur kontaminerat materialet är i övrigt av livsmedelsrester, produktrester, fukt och annat. Den nya rapporterade mängden återvunnen plast kommer alltså vara lägre än vad som syns i Figur 7.¹¹⁰

6.1 Plast i restavfall

Kategorin plast i restavfall innehåller den plast i hushållssopor som inte har sorterats ut separat utan går direkt till avfallsförbränning med energiåtervinning. Enligt SMED 2019:01 består restavfallet av 278 000 ton plast varav 249 000 ton är förpackningar. Plockanalyser som gjorts på restavfall delar upp plastinnehållet i mjukplast, frigolit, hårdplast och övrig plast. Största delen av plastavfallet består av mjukplastförpackningar (54 %) med en okänd fördelning av polymererna LDPE och PP. Ej utsorterade hårdplastförpackningar bestående av PE, PP, PS och PET samt en del okänd plast som ej gått att identifiera motsvarar 32 % av innehållet. I fallet övrig plast (13 %) förekommer PE, PP och PS men även PVC, PC och en del okänd plast. En mindre del av plastavfallet (1 %) representeras av frigolit. En viss skillnad i avfallsets polymersammansättning går att se i analyser på restavfall från villor respektive lägenheter¹¹¹. Sammanställningar av uppskattade polymersammansättningar för olika flöden visas närmare i Bilaga 1.

För att plasten i restavfallet ska kunna bli tillgänglig och anpassad för kemisk återvinning kan förbehandling krävas, exempelvis i form av sortering. Anläggningar för eftersortering av restavfall utvecklas idag av bland annat SÖRAB Söderhalls Renhållningsverk AB tillsammans med Stockholm Exergi, vid avfallsanläggningen i Brista. Stockholm Vatten och Avfall har planer på en anläggning på Högdalens industriområde. Drivkraften bakom dessa initiativ är inte minst att man så långt möjligt undvika att förbränna plast, och att man trots ansträngningar under många år ser att plastandelen i det blandade hushållsavfallet från hushåll inte minskar i tillräcklig utsträckning.¹¹² Anläggningen i Brista ska kunna ta emot upp till 140 000 ton hushållsavfall per år, varav ca 22 000 ton är plastavfall enligt uppskattning från plockanalys. En utsorteringskapacitet av plast på 75 % kan då resultera i ungefär 16 500 ton plast per år som kan

¹⁰⁹ Vukicevic, S, Personlig kommunikation. November-December 2020

¹¹⁰ European Commission 2020a

¹¹¹ Sahlin et al. 2019

¹¹² Svensk Plaståtervinning 2020

skickas till vidare sortering. Huvuddelen av den utsorterade plasten kommer vara från förpackningar, men det är oklart exakt hur mycket. Planen är att skicka allt utsorterat plastavfall från Brista till Svensk Plaståtervinnings anläggning i Motala¹¹³. Plastavfallet från eftersorteringen skulle då delvis kunna gå till materialåtervinning via sortering i Motala och den del som inte kan materialåtervinnas mekaniskt kan bli tillgängligt för kemisk återvinning. Det är också möjligt att plastavfallet kan komma att gå till kemisk återvinning direkt från eftersorteringen, om det bedöms vara av så pass låg kvalitet att det inte är lönt att återvinna mekaniskt.

Om man då förenklat spekulerar i att fem sådana eftersorteringsanläggningar i samma storlek som den i Brista skulle byggas, så skulle kapaciteten på utsorteringen av plastavfall från restavfallet uppgå till runt 100 000 ton per år. Det är i samma storleksordning som dagens kapacitet hos Svensk Plaståtervinning i Motala. Annorlunda uttryckt skulle därmed återvinningen av plastförpackningsavfall fördubblas genom en sådan utbyggnad. En viktig relaterad fråga blir då hur energin hos den utsorterade plasten kan ersättas med andra bränslen.

6.2 Utsorterade plastförpackningar

Plastförpackningar som källsorteras från hushåll och verksamheter hämtas upp från insamlingsstationer eller företag och transporteras till balningsanläggningar runt om i landet. Efter insamling sker transport till en sorteringsanläggning där den utsorterade plasten exporteras för materialåtervinning utomlands, då det i dagsläget saknas kapacitet i Sverige för det efterföljande steget med tvättning och granulering. Det restmaterial (rejekt) som uppstår vid sorteringen går till förbränning inom Sverige¹¹⁴. Det finns ett producentansvar för insamling och återvinning av de plastförpackningar som sätts på marknaden, dock uppfylls inte detta helt utan det kan även förekomma plastförpackningar i andra flöden. Mängden 96 000 ton motsvarar enligt statistiken i SMED 2019:01 endast de plastförpackningar som sorterats ut och samlats in.

En relativt ny sorteringsanläggning med modern och avancerad teknik tillhörande Svensk Plaståtervinning i Motala har kapacitet att ta emot 120 000 ton plast per år. I dagsläget nyttjas endast 100 000 ton vilket innebär att ytterligare 20 000 ton skulle kunna behandlas redan under år 2021 då ett extra skift ska införas för att nå maxkapacitet. Ur de två fraktioner som sorteras ut i form av film/mjukt material och hårda förpackningar uppkommer rejektflöden med bland annat plast som ej har kunnat identifieras av de optiska läsarna eller har bristande kvalitet. För mjukplastfraktionen sorteras endast LDPE ut. Styva förpackningar av HDPE, PP och transparenta PET-flaskor sorteras ut och resten blir rejekt. Material som skulle kunna gå att sortera ut och har potential för materialåtervinning skickas i dagsläget till förbränning då det inte finns någon marknad eller mottagare. För vissa material som till exempel PET-tråg, färgade PET-flaskor och PS finns det inte någon större materialåtervinningskapacitet/-efterfrågan för och de kan därmed vara aktuella för kemisk återvinning. Aktuellt för dessa material skulle till exempel kunna vara upplösning/utfällning eller depolymerisering, där föroreningar och tillsatser kan tas bort samtidigt som ett högt utbyte behålls. En utbyggnad av anläggningen skulle öka möjligheterna att sortera ut fler flöden. En storleksuppskattning av PET och PS, som skulle kunna sorteras ut för kemisk återvinning, är ca 5000 ton vardera.¹¹⁵

¹¹³ Höglund, S. & Carlberg, A. Personlig kommunikation. November 2020

¹¹⁴ Ljungkvist Nordin et al. 2019a

¹¹⁵ Jansson, R. Personlig kommunikation. November 2020

Idag går en stor del mjukplast/filmmaterial från plaståtervinning till avfallsförbränning. Denna ström skulle därmed kunna vara lämpligt inflöde i kemisk återvinning. Filmmaterial är ofta förorenat och har för dålig kvalitet för att vara önskvärt för materialåtervinning, bland annat på grund av flerskiktsslaminat. Det är även låg efterfrågan på återvunnet filmmaterial på marknaden. På grund av negativa marknadspriser för materialåtervinningen är det likvärdig kostnad att skicka filmrejekt till materialåtervinning och energiåtervinning. Detta plastmaterial kan i nuläget inte heller användas till nya förpackningar utan det skulle krävas förändringar i design av förpackningarna eller en materialåtervinningsprocess som kan hantera den typen av material. Svensk Plaståtervinning säger att de väljer att skicka utsorterad LDPE-mjukplast till materialåtervinning trots negativa priser. Om kemisk återvinning fanns som alternativ så skulle de, i Motala, kunna ställa om så att en mindre men renare del sorteras till mekanisk återvinning, vilket i så fall har potential att ge ett högre pris per vikt. Det är dock inte säkert att det blir högre pris även om kvaliteten på utsorterat material höjs, då det även beror på efterfrågan. Nya värdekedjor kan vara nödvändiga att etablera. Övrig mjukplast, inklusive det som blir rejekt redan idag, skulle i så fall kunna gå till kemisk återvinning. En storleksuppskattning på mjukplastflöden som skulle kunna sorteras ut och därmed direkt vara tillgängligt för ökad mekanisk eller kemisk återvinning är cirka 5000–15 000 ton polyolefiner (PE, PP). Det behöver dock göras ytterligare investeringar i anläggningen för att kunna ta ut fler materialströmmar i så fall.¹¹⁶

Svensk Plaståtervinning i Motala har under hösten 2020 fått beviljat medel från Klimatklivet för att göra ytterligare investeringar i anläggningen¹¹⁷. Fler plastfraktioner kommer sorteras ut och skickas till återvinning. En del av det som kommer sorteras ut kommer troligtvis vara just de fraktioner som diskuterats ovan. Det jobbas också på att få producenter att förändra sina plastförpackningar så att de blir mer återvinningsbara, till exempel genom att bestå av endast ett plastmaterial, ha mindre etiketter, vara transparenta eller ljusa och ha en ljus färg vid tryck på förpackningarna. Många av dessa åtgärder kan troligtvis öka andelen plastförpackningar som går till både kemisk och mekanisk återvinning. Läs mer om detta i avsnitt 9.3.2 om synergieffekter mellan kemisk och mekanisk återvinning.

6.3 PET-flaskor

Pantflaskor utgör en mindre del av det totala plastflödet med 25 000 ton och det tillkommer även cirka 7000 ton importerade PET-flaskor från Norge som återvinns i Sverige. Då materialåtervinning är dominerande i detta flöde, tack vare att det är ett väldefinierat flöde, och mesta delen av rejektet som uppkommer ej består av plast anses det inte vara aktuellt för kemisk återvinning.¹¹⁸

6.4 Fordon

Statistik från SMED 2019:01 från 2016–2017 visar ett plastavfallsflöde för kategorin fordon på 41 000 ton. Flödet är avgränsat till fordon, lätta lastbilar under 3,5 ton samt tunga lastbilar. En ungefärlig polymersammansättning för plast i fordon erhålls genom en uppskattning från en

¹¹⁶ Jansson R. Personlig kommunikation. November 2020.

¹¹⁷ SVT 2020

¹¹⁸ Ljungkvist Nordin et al. 2019a

personbil, där större delen består av PP, PE och PA6/PA66. Övriga plaster som ingår är PC/ABS, ABS, PC, PMMA, PVC och POM med flera¹¹⁹. Efter insamling och skrotning av fordon sker en demontering där reservdelar kan plockas ut, resten transporteras till en fragmenteringsanläggning. I dagsläget går största delen av plasten, 37 000 ton, från fordonskategorin till förbränning. Då plastavfallet från fragmenteringen delvis kan bestå av farligt avfall hamnar också en mindre del på deponi. Total mängd plastavfall till deponi från kategori fordon motsvarar 4000 ton enligt SMED 2019:01. I det här fallet skulle plast från fragmentering kunna utgöra ett lämpligt flöde till kemisk återvinning då det är låg geografisk spridning samt att ingen konkurrens med materialåtervinning finns. Dock finns risk för hög askhalt i materialet¹²⁰. En säkrare och högre kvalitet på plasten skulle kunna fås om den plockas ut redan i demonteringen. Detta flöde skulle då kunna vara intressant för både mekanisk och kemisk återvinning, beroende på bland annat sammansättningen av det material som sorteras ut och eventuella tillsatser i plasten.¹²¹

6.5 Elektronikavfall

Av de 31 000 ton plastavfall som motsvarar flödet från elektronikavfall går cirka 45 % av plastavfallet till materialåtervinning, 50 % till förbränning med energiåtervinning och 5 % till deponi. Den exakta graden av materialåtervinning är dock okänd då processen sker utomlands¹²². Elavfall omfattas av producentansvar och flödet kan innehålla allt från stora apparater som kylskåp till mindre produkter som lampor och mobiltelefoner. Insamlingen är uppdelad i olika fraktioner som förbehandlas hos avfallsmottagaren och sedan skickas vidare till fragmentering och sortering. Vissa delar av flödet som kan bestå av PVC eller innehålla farliga ämnen såsom brom från flamskyddsmedel sorteras ut och går till förbränning eller deponi. Motiveringen till förbränning av plasten är innehållet av flamskyddsmedel, därför skulle flödet kunna vara lämpligt för kemisk återvinning om tekniken klarar av att hantera brom och andra flamskyddsmedel¹²³. De flesta tekniker har potential att hantera brom i olika inblandningsgrad, men det beror på vilka åtgärder som tas. Detta går att läsa mer om i kapitel 5 om tillsatsämnen eller i kapitel 4 om tekniska beskrivningar. De typer av plast som enligt MIREC (f.d. SIMS Recycling)¹²⁴ förekommer i elektronikflödet består av ABS, PS/HIPS, PP, PC samt övriga plaster¹²⁵.

¹¹⁹ Ljungkvist Nordin et al. 2019b

¹²⁰ Ljungkvist Nordin et al. 2019a

¹²¹ Ljungkvist Nordin et al. 2020

¹²² Ljungkvist Nordin et al. 2019b

¹²³ Ljungkvist Nordin et al. 2019a

¹²⁴ SIMS köptes 1 april 2020 av REMONDIS Group och är nu en del av TSR Recycling under namnet MIREC

¹²⁵ Ljungkvist Nordin et al. 2019b

6.6 Bygg- och rivningsavfall

Från en arbetsplats för bygg- eller rivningsarbeten transporteras blandat avfall till en avfallsmottagare och sorteringsanläggning. Därefter går större delen till förbränning. Avfallsströmmarna från byggen och rivningar skiljer sig mycket med avseende på innehåll, dock ses de ofta som ett gemensamt flöde¹²⁶. I statistik för plastavfall presenteras bygg- och rivningsavfall i samma kategori med ett totalt flöde på 152 000 ton samt en materialåtervinningsgrad på 0,8 %. Även om 63 000 ton plast redovisas som utsorterad återvinns endast cirka 1000 ton och resten går till förbränning¹²⁷.

Plockanalyser har utförts på brännbart byggavfall, närmare bestämt installationsrester och -avfall, där det delas upp i mjuka plastförpackningar, 49 %, isolering/cellplast, 18 %, hårdplast, 14 %, och rör, 13 %¹²⁸. I kategorin rör finns en närmare uppskattning på polymertyp för installationsrester med PE, 40 %, PP, 20 % och PVC, 20 % och övriga rör som kan bestå av andra plastsorter¹²⁹. I plockanalys av rivningsavfall från exempelvis lägenheter byggda på 1980-talet återfanns mjuka plastförpackningar, 54 %, isolering, 31 % och rör, 15 %¹³⁰.

Från rivning samt renoveringar förekommer äldre typer av PVC-plast med additiver i form av bly och mjukgörare som ej får återvinnas till nya produkter¹³¹. Plastavfallsstatistik från byggnader och konstruktioner visar en hög andel PVC på 62 %, dock motsvarar detta europeiska data vilket skulle kunna skilja sig från Sverige¹³².

Utmaningar som måste hanteras för detta flöde är därmed stora variationer i sammansättning, avsaknad av närmare kunskap om innehållet i avfallsflödet samt omfattande behov av förbehandling eller sortering. Mycket av detta plastmaterial skulle kunna gå till både mekanisk och kemisk materialåtervinning vid utökad utsortering, i synnerhet plastavfallet från nybyggnation som ofta kan bestå av relativt homogena flöden. I och med den geografiska spridningen på avfallet skulle transporten då behöva lösas och hanteras på ett kostnadseffektivt sätt för att göra plastmaterialet tillgängligt för båda återvinningsmetoderna¹³³. Sedan 1 augusti 2020 finns nya krav på utsortering som innebär att plast ska sorteras i en separat fraktion. Det är ännu för tidigt att uttala sig om hur detta fallit ut, men eftersortering lär i alla fall behövas om all plast samlas i en fraktion.

¹²⁶ Sahlin et al. 2019

¹²⁷ Ljungkvist Nordin et al. 2019b

¹²⁸ Sahlin et al. 2019

¹²⁹ Ljungkvist Nordin et al. 2019a

¹³⁰ Sahlin et al. 2019

¹³¹ Ljungkvist Nordin et al. 2019a

¹³² Fråne et al. 2017

¹³³ Ljungkvist Nordin et al. 2019a

6.7 Blandat avfall från verksamheter (till förbränning)

Blandat avfall från verksamheter kan anses vara allt som inte är hushållsavfall då det saknas en riktig definition. I SMED Rapport 2019:01 samlas det blandade verksamhetsavfallet som går till förbränning i en egen sektion. Av de närmare 800 000 ton som redovisas i statistiken är 280 000–560 000 ton plast som importerats endast i syftet förbränning med energiåtervinning. Resten inkluderar svenskt blandat plastavfall och sorteringsrester från verksamheter som går till förbränning¹³⁴. Då det utsorterade plastavfallet från industrier redovisas i ett separat flöde inkluderas detta istället i ett eget avsnitt nedan.

Plastavfall från verksamheter som uppkommer i Sverige och idag skickas till förbränning bör egentligen kunna vara aktuellt för materialåtervinning, men sannolikt behövs då vidare sortering. Även importerat hushållsavfall och sorteringsrester skulle i teorin kunna sorteras innan förbränning i en eftersorteringsanläggning som nämnts i tidigare avsnitt. Då finns potential för både mekanisk och kemisk återvinning av plasten. Undantaget är om importerat avfall är RDF, ”refuse-derived fuel”, då det i så fall är ihop-pressat (till exempel briketterat) blandat avfall och knappast lämpligt för ytterligare sortering. En utmaning finns också med den stora geografiska spridningen av flödet från verksamheter inom Sverige och behovet av transporter¹³⁵, vilket kan försvåra kostnadseffektiviteten i insamlingen. Det skulle eventuellt också behövas någon form av utsorteringskrav för plast i avfall som importeras till förbränning.

6.8 Utsorterad plast från industrier

Den utsorterade plast från verksamheter och industrier som inte går till förbränning redovisas separat i SMED 2019:01 och motsvarar ett flöde på 143 000 ton. Problemet som uppstår vid kartläggningar av detta flöde är svårigheten att få en översikt om huruvida plasten återvinns eller förbränns på grund av den fria marknad som råder för verksamhetsavfall och det stora antalet inblandade aktörer. Det troliga är dock att större delen går till förbränning och mindre delar till materialåtervinning¹³⁶.

6.9 Grovavfall

Plast i kategorin grovavfall som samlas in i återvinningscentraler kan delas upp i ej utsorterade förpackningar, kommunplast och övrig plast. Kommunplast består av hårdplast som domineras av PP, HDPE och PS/ABS¹³⁷. Transport sker till en grovsorteringsanläggning där plasten sorteras med avseende på kvalitet, därefter går en fraktion vidare till finsortering och resten till förbränning. Av de 77 000 ton som motsvarar flödet uppskattas 75 000 ton gå till förbränning och 2000 ton till mekanisk återvinning med en materialåtervinningsgrad på 2,6 %¹³⁸. Plockanalyser har utförts på grovavfall från återvinningscentraler där en plastsammansättning från en återvinningscentral (ÅVC) i Malmö kan motsvara hårdplast (56 %), PVC (7 %), mjukplast/folie

¹³⁴ Ljungkvist Nordin et al. 2019b

¹³⁵ Ljungkvist Nordin et al. 2019a

¹³⁶ Ljungkvist Nordin et al. 2019a

¹³⁷ Ljungkvist Nordin et al. 2019b

¹³⁸ Ljungkvist Nordin et al. 2019b

(3 %), sammansatta plastprodukter (11 %) och övrigt (23 %). I hårdplastfraktionen återfanns PP (50 %), PS/ABS (13 %), HDPE (12 %), PC (9 %), PET (5 %) och oidentifierbar samt övrig plast (12 %) ¹³⁹.

Ej utsorterad plast inklusive förpackningar som går till förbränning skulle i teorin kunna vara ett passande flöde till kemisk återvinning, för vissa tekniker skulle det dock troligtvis behöva förbehandlas en del för att passa. Både mekanisk och kemisk återvinning gynnas av rena plastflöden vilket ställer krav på utsortering och tvättning. I sorteringsanläggningar på till exempel Svensk Plaståtervinning och Swerec sorteras mjukplast ut från hårdplast med hjälp av luftströmmar och NIR-läsare (near infrared light), dock är inte processen fullständig utan vissa fraktioner mjukplast kan finnas kvar och sänka kvaliteten på hårdplastfraktionen. Insamling av plast på ÅVC hanteras av kommuner. Insamlingens kostnader måste balanseras mot miljönytta/materialåtervinning och kundvänlighet. Eventuell utbyggnad av insamlingen med fler sorteringskärl på en ÅVC är därmed inte en självklar lösning då det kan försvåra för kunder och generera ökade utgifter ¹⁴⁰. Om insamlingen sker som tidigare kan företaget som hanterar eftersorteringen istället få fler möjliga avsättningar om kemisk återvinning finns tillgängligt. Den del av plasten som inte har tillräckligt hög kvalitet för mekanisk återvinning kan då skickas till kemisk återvinning.

6.10 Lantbruksplast

Ett mindre flöde av lantbruksplast består mestadels av ensilagefilm, dunkar, odlingsfolie och säckar. Större delen av flödet motsvarar därmed mjukplast i form av polyeten ¹⁴¹. Av de 18 000 ton som rapporteras i SMED 2019:01 samlades cirka 16 000 ton in till mekanisk återvinning och resterande 2000 ton gick till förbränning. Det är dock okänt hur stor del av den insamlade plasten som verkligen blir nya plastprodukter på grund av materialets tvättbehov och att det anses finnas begränsad tvättkapacitet. Därmed finns risken att en större del ändå går till förbränning i slutändan. Här finns det möjlighet att kemisk återvinning skulle kunna vara ett alternativ till förbränning ¹⁴².

6.11 Plast i vätskekartong

Ett annat mindre flöde som innehåller plast är förpackningar i form av vätskekartong med beläggning av plastfilm. Uppskattningen på storleken av detta flöde är cirka 10 000 ton per år vilket är en summa av a) den mängd som går med i utsorterad kartong vilket baseras på uppgifter från Fiskeby Board ¹⁴³, som tillverkar förpackningskartong från returfiber och där plasten blir ett rejekt, och b) den mängd i vätskekartong som inte utsorteras utan går med restavfall till förbränning, vilket baseras på uppgifter från plockanalyser hos Envir ¹⁴⁴. Detta flöde innehåller en del fibrer och kan därför möjligen vara mindre väl lämpat för pyrolys, dock skulle det kunna vara passande för förgasning. Storleksmässigt är det dock ett relativt litet flöde jämfört med övriga.

¹³⁹ Fråne et al. 2017

¹⁴⁰ Fråne et al. 2017

¹⁴¹ Lätt et al. 2020

¹⁴² Ljungkvist Nordin et al. 2019b

¹⁴³ Sundblad, A. Personlig kommunikation. November 2020

¹⁴⁴ Vukicevic, S. Personlig kommunikation, November-december 2020

6.12 Andra plastflöden

Övriga plastflöden som inte har behandlats ovan består till exempel av sjukvårdsmaterial, båtar och vindkraftverk. Dessa flöden är problematiska att materialåtervinna mekaniskt på grund av kontaminering och smittorisker samt att plasten i vindkraftverksblad och fritidsbåtar är ett kompositmaterial som innehåller glasfiber¹⁴⁵. Båda skulle möjligen kunna vara potentiella för kemisk återvinning, dock krävs det att tekniken kan hantera kompositer, vilket hittills inte har visat sig praktiskt och ekonomiskt görbart, samt att den termiska processen är tillräcklig för att eliminera smittoämnen.

Vindturbinbladen har lång livslängd på ca 20–25 år, men då installation av vindkraftverk tog fart 1990-talet förväntas denna avfallsström öka, från nu och framåt. I projektet Rekovind har det estimerats att ca 1000 vindturbinblad kommer behövas tas ned i Sverige mellan åren 2020 och 2025, det vill säga 740 ton/år glasfiberkompositavfall. Efter år 2025 väntas en femfaldig ökning till 3500 ton/år.¹⁴⁶ Vindturbinblad går idag delvis på andrahandsmarknaden men förbränning och deponi sker också.

Vindturbinbladen i vindkraftsverken är konstruerade av glasfiberhårdplastkomposit som består av glasfiber (ca 60–70 %) och hårdplast (ca 20–30 %) samt balsaträ och övriga plaster (PVC/PET). Hårdplaster kan ej omsmältas på grund av tvärbindingar i kompositen mellan plast och glasfiber. Här kan termokemiska återvinningsprocesser utvecklas baserade på solvolys, pyrolysis och förgasning. Optimalt vore att få återvinna fraktioner av en ren glasfiber och att hårdplasten bildar en olja som kan bli en ström in i dagens raffinaderier för produktion av plast och drivmedel. Utveckling av dessa processer är komplicerad eftersom plastfraktionen är låg, det vill säga ger lågt oljeutbyte, samtidigt som det är svårt att få en högkvalitativ glasfiber och nytillverkad glasfiber är av låg kostnad (ca 10 kr/kg). Därför saknas den ekonomiska potentialen för att utveckla dessa återvinningsprocesser.¹⁴⁷

Vi anser därför att potentialen är starkt begränsad här, i alla fall i det korta tidsperspektivet, alltså på några års sikt.

6.13 Sammanställning av polymertyper i plastavfallsflöden

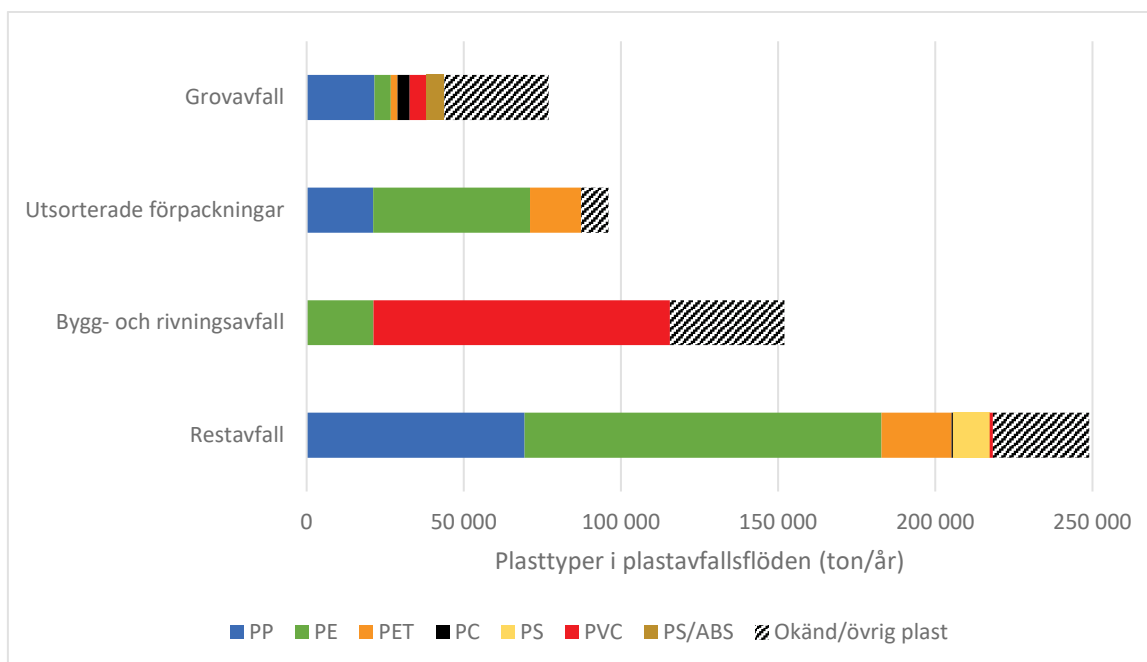
En överblick över polymersammansättningarna i olika plastavfallsflöden har sammanställts i Figur 8 och Figur 9 nedan. Då polymertyperna för de två flödena med blandat verksamhetsavfall är okända samt relativt stora har dessa exkluderats för lättare översikt. Flödenas storlekar är baserade på statistik från år 2016–2017 som visas i Figur 7. Statistik och plockanalyser som

¹⁴⁵ Ljungkvist Nordin et al. 2019a

¹⁴⁶ Mattsson et al. 2020b

¹⁴⁷ Mattsson et al. 2020

indikerar polymersammansättning varierar för olika flöden, analyser samt statistik har utförts och sammanställts mellan år 2014–2018^{148,149,150,151,152}.



Figur 8. Översiktsskild över uppskattade polymersammansättning för plastavfallsflöden i Sverige baserat på analyser som utförts mellan 2014–2018^{153,154,155,156,157}, snedstreck motsvarar ”och/eller”, för detaljer se Bilaga 1.

¹⁴⁸ Fråne et al. 2017

¹⁴⁹ Ljungkvist Nordin et al. 2019a

¹⁵⁰ Ljungkvist Nordin et al. 2019b

¹⁵¹ Lätt et al. 2020

¹⁵² Sahlin et al. 2019

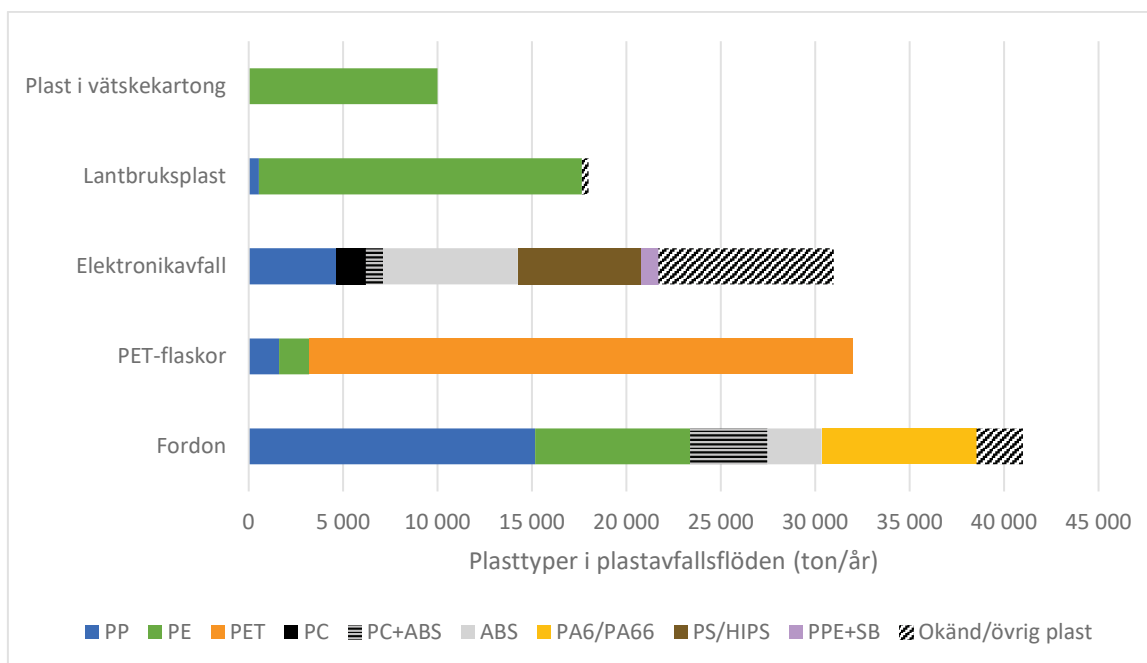
¹⁵³ Fråne et al. 2017

¹⁵⁴ Ljungkvist Nordin et al. 2019a

¹⁵⁵ Ljungkvist Nordin et al. 2019b

¹⁵⁶ Lätt et al. 2020

¹⁵⁷ Sahlin et al. 2019



Figur 9. Översiktsbild över uppskattade polymersammansättning för plastavfallsflöden i Sverige baserat på analyser som utförts mellan 2014–2018^{158,159,160,161,162}, snedstreck motsvarar "och/eller" och plustecken används för blandningar, för detaljer se Bilaga 1.

Blandat plastavfall från verksamheter är ett komplext flöde på en fri marknad med varierande sammansättning där större delen är importerat avfall från andra länder som går till förbränning. Det är därför svårt att avgöra en faktisk sammansättning på flödet. Samma situation med fri marknad och okänt innehåll gäller flödet för utsorterad plast från industrier.

För plockanalyser av restavfall återfinns data för villor och lägenheter separat, i denna studie valdes restavfall från lägenheter där plockanalys har utförts år 2018¹⁶³. Plastsammansättningar för utsorterade förpackningar och lantbruksplast har hämtats från plastavfallsstatistik i SMED Rapport 05:2020¹⁶⁴. För bygg- och rivningsavfall är statistiken baserad på europeiska data från 2014¹⁶⁵.

En plastsammansättning i grovavfall från återvinningscentraler har hämtats ur plockanalyser som har utförts i Sverige¹⁶⁶. Till denna sammanställning valdes en plockanalys från Sysav i Malmö (ÅVC Norra Hamnen) från en studie som gjordes 2017 då den innehöll en närmare beskrivning av plasten som förekom i hårdplastfraktionen.

¹⁵⁸ Fråne et al. 2017

¹⁵⁹ Ljungkvist Nordin et al. 2019a

¹⁶⁰ Ljungkvist Nordin et al. 2019b

¹⁶¹ Lätt et al. 2020

¹⁶² Sahlin et al. 2019

¹⁶³ Sahlin et al. 2019

¹⁶⁴ Ljungkvist Nordin et al. 2019b

¹⁶⁵ Lätt et al. 2020

¹⁶⁶ Fråne et al. 2017

För PET-flaskor uppskattas sammansättningen baserat på ungefärlig vikt av flaska och kork, där korkarna kan bestå av PET, HDPE och PP¹⁶⁷. Resterande flöden har hämtats ur SMED 2019:01 där fordonsflödet uppskattas till en typisk plastsammansättning i en personbil och plastinnehållet i elektronikavfallet kommer ur statistik från MIREC. Kategorin ”okänd/övrig plast” för fordon innehåller bland annat PVC, PMMA, POM och PC men fördelningen mellan dem är okänd¹⁶⁸.

En mer detaljerad tabell över plastsammansättningarnas uppskattade siffror återfinns i Bilaga 1.

¹⁶⁷ Pantamera u.å.

¹⁶⁸ Ljungkvist Nordin et al. 2019b

7 Klimat- och annan miljöpåverkan

Som en illustration för att bedöma den direkta och indirekta miljöpåverkan för de olika teknikerna för kemisk återvinning av plast har modeller för livscykelanalys (LCA) upprättats för pyrolys och förgasning, då dessa två tekniker bedömts vara mest under diskussion i Sverige. I teknikbeskrivningarna i kapitel 4 finns samtliga tekniker beskrivna inklusive egenskaper som har bäring på miljöprestanda.

LCA är en välkänd metod för undersökning av miljöprestanda, resursförbrukning och utsläpp för produkter och produktsystem. De olika stegen i livscykeln från materialproduktion och tillverkning till användning och avfallshantering kan utvärderas samt anpassas till studiens omfattning. Modelleringen har utförts med hjälp av GaBi Software/Sphera.

7.1 Mål och omfattning

Två av de existerande teknikerna för kemisk återvinning av plast, pyrolys och förgasning, valdes ut som modelleringsobjekt med avseende på det aktuella utvecklingsstadiet samt mängden tillgänglig information om data. Pyrolys genererar pyrolysolja som kan ersätta framställning av plast från fossil olja och förgasningsprocessen producerar primärt en blandning av kolmonoxid och vätgas som därefter med tillsats av extra vätgas syntetiseras till metanol som kan ersätta fossilbaserad metanol. I studien används 1000 kg utsorterat LDPE-plastavfall som funktionell enhet.

7.2 Miljöpåverkanskategori klimat

Resultaten av de kvantitativa beräkningarna omfattar endast klimatgasutsläpp. Andra miljöpåverkanskategorier kommenteras kvalitativt i slutet av kapitlet. Resurs- energi- och klimataspekter är dock nära sammankopplade då man studerar plaståtervinning, eftersom materialresursen plast också är energirik och vid förbränning ger upphov till klimatgasutsläpp. Det innebär att för att beräkna klimatgasutsläpp behöver man ha tillgång till eller ansätta rimliga värden på utbyten och energiåtgång i olika delar av systemet, samt välja energislag. Därmed fås en god allmän förståelse för hur en process hänger ihop med kringliggande system, t ex energisystemet. Indirekta effekter, i detta fall främst mängd elektricitet och produktionssätt för detta, samt förhållanden i och kring avfallsförbränningsanläggningar som är ett alternativt sätt att behandla plastavfall som inte kan återvinnas mekaniskt, kommer att ha stor inverkan på systemets prestanda. Men dessa kringliggande faktorer säger kanske inte så mycket om teknikens egen inneboende prestanda.

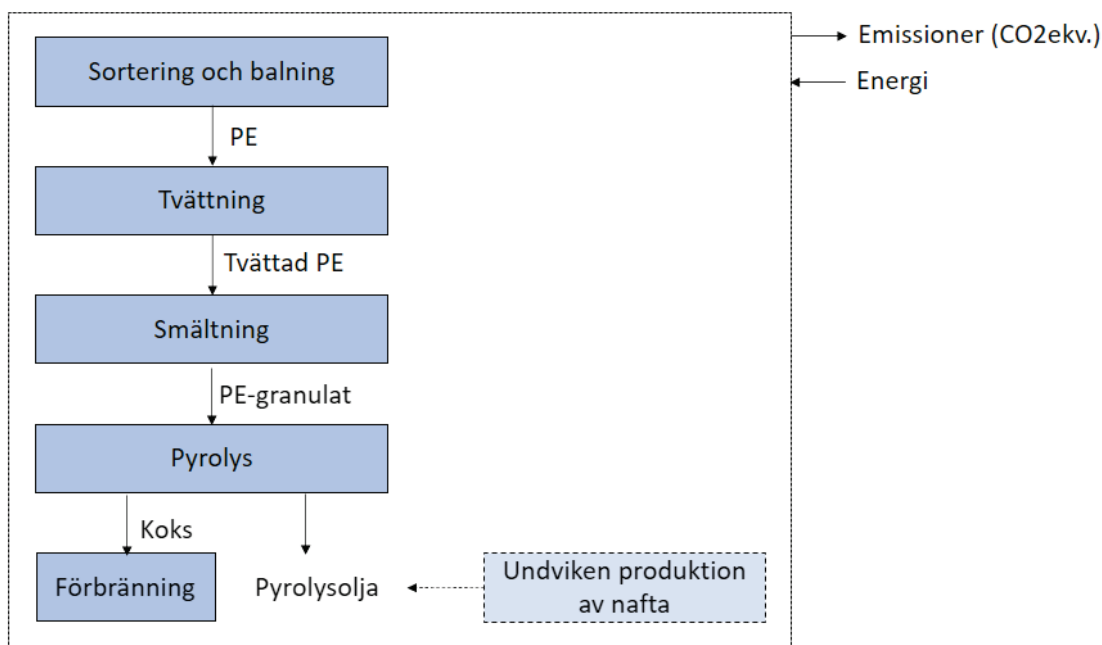
I studien används en indikator för global uppvärmning och mängd koldioxidutsläpp då det i detta fall saknas komplett processdata för att kvantitativt kunna täcka in fler kategorier för miljöpåverkan.

Tabell 1. Kategori för miljöpåverkan.

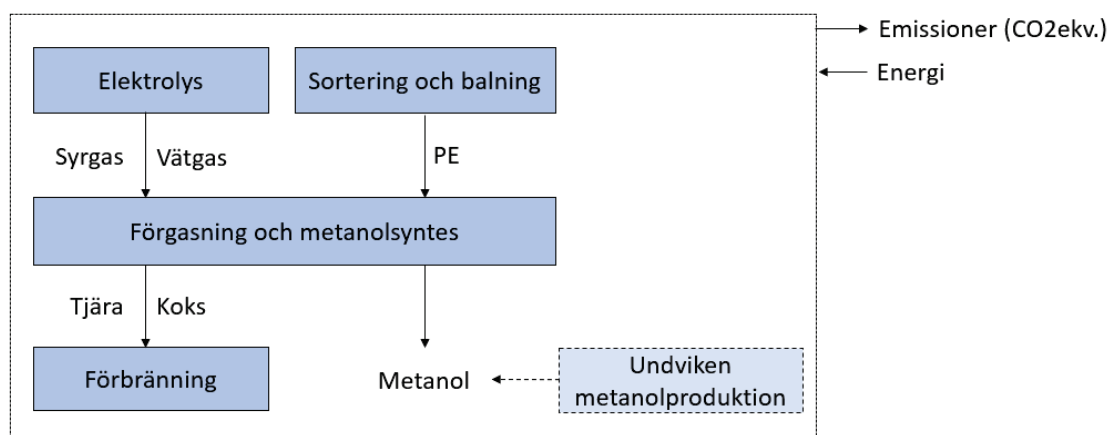
Kategori för miljöpåverkan	Kategoriindikator	Referens
Global warming potential (GWP) – Climate change	kg CO ₂ -ekv	CML 2001, April 2016

7.3 Systemgränser

I studien ingår behandling av plastavfall i respektive modellerad anläggning för kemisk återvinning samt resulterande produkter. Sorteringsanläggning och kemisk återvinning antas vara placerade i Sverige och drivs under svenska förhållanden. Transporter med kortare distans som antas vara likvärdiga för teknikerna har inte inkluderats i beräkningarna. Flödesschema för pyrolys- och förgasningsprocessen i modelleringen visas i Figur 10 respektive Figur 11.



Figur 10. Flödesschema för modellen för pyrolysisprocessen.



Figur 11. Flödesschema för modellen för förgasningsprocessen.

7.4 Avgränsningar och antaganden

Då teknikerna för kemisk återvinning till stor del fortfarande befinner sig i utvecklingsstadiet och i några fall drivs i pilotskala eller på annat sätt liten skala har beräkningarna till stor del baserats på indikativa värden och teoretiska beräkningar, och resultaten får därför också ses som indikativa. Koldioxidutsläpp från pyrolys och förgasning har beräknats genom massbalans på kemiska komponenter i pyrolys och förgasning och baseras uppgifter som erhållits ut intervjuer. Begränsningarna för LCA-studien grundas därmed på avsaknaden av processspecifika data för teknikerna pyrolys och förgasning i full skala. Bristen på processdata utgör också en begränsning för hur mycket information om miljöeffekter som går att få ut från modellen. För att kunna inkludera andra indikatorer behövs därmed en mer omfattande studie och insamling av data för olika tekniker.

I förgasningsprocessen krävs inflöde av vätgas och syrgas vilket antas produceras via elektrolys. I modellen och beräkningarna antas det vara LDPE-plast som återvinns. Vi inkluderar inte produktionen av plast då denna är samma för alla alternativ och fokus är på själva återvinningsmetoderna.

Resultatet kommer också att bero på vilken sammansättning av pyrolys- och förgasningsprodukter som antas i modellen. Uppskattningarna som gjorts bygger på information om ungefärlig sammansättning som erhållits från specifika anläggningar. Denna kan i olika faktiska fall variera inom ganska vida intervall beroende på anläggning, processinställningar och avfallsets innehåll. De antaganden, uppskattningar och manuella beräkningar som gjorts gällande koldioxidutsläpp har då stor påverkan på resultatet.

7.5 Inventeringsanalys

Underlag till processspecifika data för pyrolys och förgasning har inhämtats från intervjuer med representanter för respektive typ av anläggning. Manuella beräkningar har utförts för anpassning av information från intervjuer och uppskattningar har använts för att fylla dataluckor. Övriga processdata för modelleringen har hämtats från databaser som tillhandahålls av thinkstep/GaBi, EcoInvent och IVL Svenska Miljöinstitutet.

7.5.1 Pyrolys

De resurser som har använts i modellen för pyrolys visas i Tabell 2. Produktsammansättningen från pyrolysen har antagits vara 72 % olja, 18 % gas, 8 % koks och 2 % vatten. Gas och koks antas förbrännas och därmed generera utsläpp av koldioxid.

Tabell 2. Inflöden till pyrolysprocessen.

Inflöde	Mängd	Enhet
Plastavfall	1000	kg
Elektricitet	3863	MJ

7.5.2 Förgasning

Förgasningsprocessens produkter har antagits genom beräkningar med avseende på kemisk sammansättning. Resurserna som används i modellen för förgasning visas i Tabell 3. Ett inflöde av 1000 kg plast beräknas generera cirka 1,6 ton metanol. Utöver metanol bildas även tjära, koks

och koldioxid. Produkterna antas förbrännas internt i processen och generera utsläpp av koldioxid. Processdata för produktion av vätgas och syrgas via elektrolys till förgasningen har erhållits från en separat studie där utfallet blir 7,94 kg syrgas per producerat kg vätgas¹⁶⁹. En ekonomisk allokering användes för fördelning av miljöpåverkan på elektrolyprodukterna där 53 % tillskrivs vätgas.

Tabell 3. Inflöden till förgasningsprocessen.

Inflöde	Mängd	Enhet
Plastavfall	1000	kg
Vätgas	82.6	kg
Syrgas	1174.8	kg
Elektricitet	443 + 12 519 (O ₂) + 7855.26 (H ₂)	MJ

7.6 Resultat – Miljöpåverkansbedömning

7.6.1 Klimatpåverkan

Resultaten för klimatpåverkan från modelleringen av pyrolys respektive förgasning visas nedan i Figur 12. I diagrammen inkluderas för jämförelse även mekanisk återvinning med ersatt jungfrulig plast samt förbränning med energiåtervinning med ersatt svensk elektricitet och fjärrvärme, funktionell enhet är 1000 kg LDPE-plastavfall.

Man kan utläsa några olika intressanta saker ur analysen och resultaten som presenteras i Figur 12. Det framgår tydligt att utsläppen från mekanisk återvinning är mycket små. Det finns en viss miljöpåverkan bland annat från produktionen av den elektricitet eller andra energibärare som behövs för separation och tvättprocesser. Utsläpp från pyrolys och förgasning är ungefär lika i denna beräkning, och ungefär en femtedel av utsläppen från avfallsförbränning. En viktig skillnad är dock att utsläppen från förgasningen sker från själva processen, medan det för pyrolysen sker indirekt genom att de gasformiga produkterna antas förbrännas i en panna för att generera processenergi. Åtminstone en del av det flödet skulle också kunna återvinnas som produkt, i en storskaligare, mer optimerad anläggning, och där energin istället tillförs från annan källa, som då kan vara en klimatsnål energikälla, till exempel grön el.

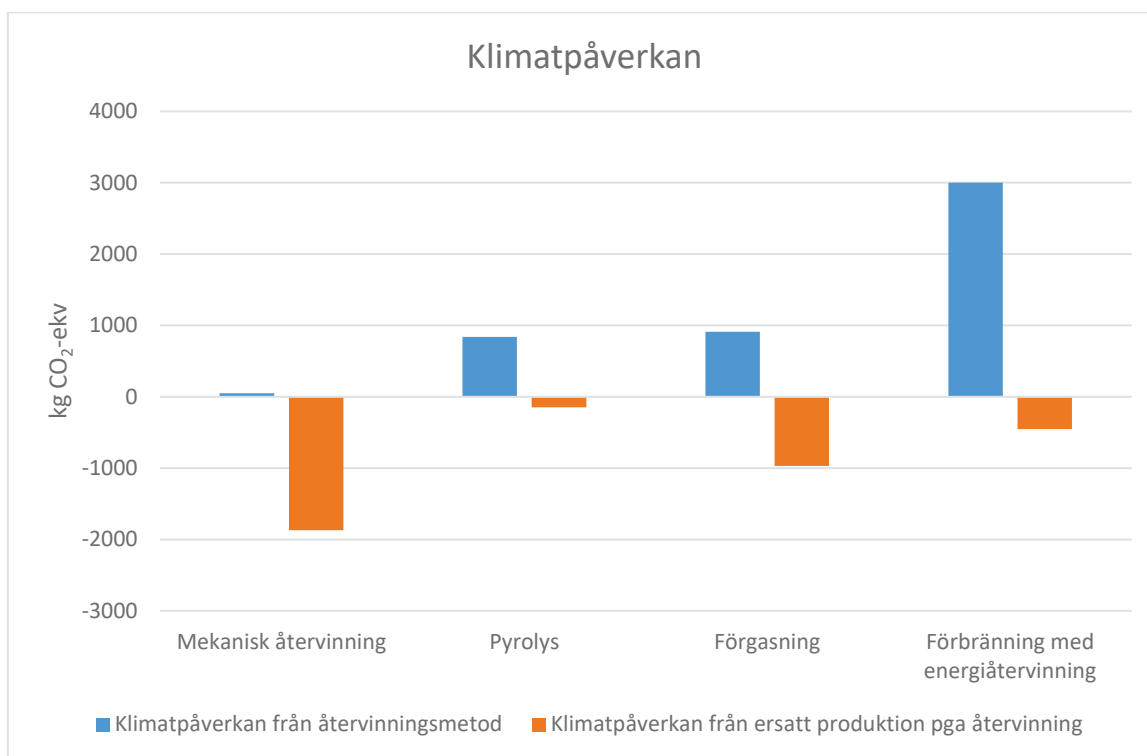
En annan viktig uppenbar observation av analysen är att det uppstår en klimatnytta genom undanträngning av fossila alternativ. Pyrolysolja antas här ersätta fossil nafta, medan förgasning antas ersätta fossil metanol. Produktion av fossil metanol är mer koldioxidintensiv än produktion av fossil nafta och därför är undanträngningseffekten större för förgasningsalternativet. Men förgasningsalternativet innehåller också en metanolsyntes där det tillförs extra vätgas. Vi har räknat med vätgas framställd genom elektrolys där elektriciteten antas vara klimatsnål svensk nationell mix. Här spelar förstas koldioxidintensiteten i den tillförda energin stor roll. Den mekaniskt återvunna plasten antas tränga undan plast tillverkad av jungfrulig fossil råvara. Då produktion av plast är mer koldioxidintensiv än produktion av både fossil nafta och fossil metanol så uppstår en ännu större undanträngningseffekt i det fallet. Vi har räknat med en återvunnen produkt med hög kvalitet, från en väl sorterad fraktion av LDPE. Om det istället hade varit en mix av till exempel mjukplast bestående av LDPE, PP och flerskiktsförpackningar så hade

¹⁶⁹ Sundin 2019

undanträngningseffekten blivit mycket lägre för den mekaniska återvinningen, då en lägre andel hade ersatt jungfrulig plast. De övriga tre fallen hade endast påverkats marginellt av en sådan mix.

Förutom de beräknings specifika antagandena enligt ovan finns andra faktorer som kommer in i bilden då man överväger att bygga en anläggning och väljer mellan till exempel pyrolys eller förgasning, såsom möjligheten att integrera en process med befintliga processer.

Det medför att en rimlig slutsats av den här analysen är att klimataspekten inte ensamt har en avgörande betydelse i valet mellan pyrolys och förgasning. De två alternativen får ses som relativt likvärdiga, där lokala förutsättningar i det enskilda fallet kommer att ha stor inverkan. Däremot är det tydligt och förstås inte överraskande att kemisk återvinning som teknikfamilj intar ett klimatmässigt mellanläge mellan mekanisk återvinning och förbränning.



Figur 12. Resultat för beräknad klimatpåverkan från modellerna för pyrolys- och förgasningsprocesserna med ersatt produktion av fossil petroleumnafta respektive fossil metanol, visas tillsammans med mekanisk återvinning och energiåtervinning genom förbränning i Sverige. Alla resultat är beräknade för 1000 kg plastavfall.

Vid jämförelse av resultatet med andra studier behöver man ta hänsyn till studiernas innehåll och omfattning. Det går möjligtvis att se om resultaten är i samma storleksordning, dock finns många faktorer som påverkar slutsiffrorna. Det är också svårt att göra en korrekt jämförelse om man inte har tillgång till fullständig metod och data. Val av energi och elektricitetsmix samt vilket land som studien har utförts på har stor betydelse då det kan finnas stora variationer mellan olika länder och olika anläggningar. När det gäller omfattning kan studier ha tagit med olika delar i produktionskedjan från plastproduktion till återvinning och olika ersatta produkter. I detta fall tittar vi endast på själva återvinningsprocesserna och presenterar den ersatta nyproduktion som det återvunna materialet resulterar i, vilket antas vara fossil metanol och fossil petroleumnafta.

En liknande studie från CE Delft med koldioxidavtryck för pyrolys och förgasning av ett ton blandad plast med en tysk elektricitetsmix och energieffektivitet visar motsvarande värden på ca 350 kg CO₂-ekvivalenter (CO₂-ekv) per ton plast för pyrolys samt ca 400 kg CO₂-ekv per ton plast för förgasning avläst ur resultatdiagram¹⁷⁰. För jämförelse landar siffrorna för studien ovan på ca 840 kg CO₂-ekv per ton LDPE-plast för pyrolys och ca 910 kg CO₂-ekv per ton LDPE-plast för förgasning. Det är svårt att avgöra helt vad som orsakar skillnaden mellan deras och vår studie, då deras metod inte är beskriven i detalj. De säger att metoden är till viss del baserad på resultat från en tidigare studie¹⁷¹ från CE Delft, där det går att utläsa mer. I den studien så går det att utläsa att de har räknat med en betydligt lägre energiåtgång och lägre förluster för pyrolysen än vad vi har räknat med och de utnyttjar dessutom överbliven syntesgas för att ersätta annan syntesgas i industrin. Även deras modell för förgasning ser ut att använda en betydligt lägre energiåtgång än vad vår modell gör. I deras modell så används syntesgasen för att ersätta annan syntesgas i industrin, istället för att omvandla den till metanol så som i vår modell, vilket bidrar till att de kan anta att en mycket större andel av kolatomerna hamnar i en slutprodukt.

BASF har utfört en LCA-studie för att jämföra pyrolys och förbränning av ett ton blandat plastavfall där pyrolysoljan ersätter fossil nafta. Denna visar ett värde på strax över 1000 kg CO₂-ekv per ton blandat plastavfall för pyrolys¹⁷². Som jämförelse landar vi i studien ovan på ca 840 kg CO₂-ekv per ton LDPE. Skillnader i CO₂-utsläpp och nytta kan bero på bland annat val av energi- och elektricitetsmix, land och plasttyp som används i studien, vilket även blir tydligt i resultatet för klimatpåverkan från förbränning. Om vi hade använt nationell genomsnittlig el- och energidata för Tyskland i modellen för pyrolys hade vi fått mer CO₂-utsläpp från processen. Siffrorna hade även sett annorlunda ut om vi hade använt blandad plast istället för enbart utsorterad LDPE.

Dock är det svårt att säga vad skillnaden mellan studierna är då man saknar detaljer och beräkningarna kan vara utförda på olika sätt. Då vårt fall är en pilotstudie finns givetvis utrymme för förbättringar och utveckling av modellen.

7.6.2 Andra miljöpåverkanskategorier

Som nämnt har indirekta aspekter såsom kopplingen till kringliggande energisystem stor inverkan på miljöprestanda på systemnivå för dessa tekniker, inte minst för klimatprestanda.

Energisystemet bidrar även till andra miljöaspekter som vi inte går in på här. Men det finns också anledning att kort beskriva och diskutera vissa miljöaspekter kopplade mer eller mindre direkt till processerna. Detaljerad faktisk information för olika tekniker har inte gått att få fram utan följande punkter är allmänna resonemang utifrån de olika teknikernas karakteristik.

Flyktiga organiska ämnen: Samtliga processer hanterar monomerer, lösningsmedel eller olika mindre molekyler bildade av polymerkedjorna¹⁷³. Flera av processerna äger rum vid hög

¹⁷⁰ Bergsma et al. 2019

¹⁷¹ Bergsma et al. 2017

¹⁷² BASF 2020

¹⁷³ Toraman et al, 2014

temperatur. Det finns en risk för att utsläpp kan ske av de ämnen som förekommer i processerna. Risken kan knappast sägas vara större eller mindre än vid andra kemiska och kemitekniska processer eller förbränningsanläggningar.

Partiklar: Partiklar kan uppkomma vid högtemperaturprocesser av det slag som finns beskrivna i denna studie. Partikelfilter och liknande kommer därför normalt att behövas för att undvika eller minimera partikelutsläpp till luft.

Oorganiska föreningar: Metaller, halogener, syre, kväve och svavel i processerna, antingen om de följer med avfallsflödet in i processen eller med luft (sure och kväve), kan bilda olika oorganiska föreningar som behöver hanteras. Detta finns mer utförligt beskrivet i Kapitel 5.

En övergripande synpunkt som framkommit under många intervjuer med anläggningsägare är att den här typen av anläggning lyder under lagstiftning som gör att olika utsläppsrisker för anläggningarna kommer att hållas under kontroll.

8 Hinder för kemisk återvinning av plastavfall

Under de intervjuer som vi har haft med plastinsamlare, teknikleverantörer och nyttiggörare av produkter från kemisk återvinning, forskare på Chalmers och IKEM har vi haft med frågan om vad de ser för hinder för att få till kemisk återvinning av plastavfall. Det rör sig om drygt 15 intervjuer. Vi har gjort en syntes av de olika hinder som presenterats. Denna syntes presenterades vid den workshop som anordnades den 2 december 2020¹⁷⁴.

Till workshopen bjöd vi in i första hand representanter för de aktörer som intervjuats, inklusive, Naturvårdsverket, Tyska Naturvårdsverket (UBA). Men vi bjöd även in andra aktörer som förväntades kunna ge kompletterande information till analysen. På workshopen så presenterades syntesen av intervjuerna och i workshopen så fick deltagarna i grupper diskutera de förslagna punkterna, enligt följande:

1. Baserat på den presenterade hinderanalysen, stämmer detta med er uppfattning? Vilka andra hinder kan vara relevanta?
2. Ange och diskutera förslag på hur man kan övervinna hindren

Vi samlade in dokumentation från de 5 grupperna som vi har sammanställt i punktlistan nedan i det vi bedömer vara de 10 viktigaste punkterna. Några skulle kunna användas som underlag till direkta förslag till aktiviteter, medan andra snarare kan ses som idéer som skulle behöva bearbetas vidare.

8.1 Sammanställning av de huvudsakliga hindren presenterade på intervjuerna

Nedan redovisas de 10 punkterna i listan som extraherats ur diskussionerna på workshopen, med lite kommentarstext vid varje punkt för mer detaljer, såsom deltagarnas uppfattning om hindrets betydelse. Punkterna är utan inbördes prioriteringsordning.

- 1. Långsiktighet. Policyer och regler behöver vara tydliga och förutsägbara. Policyer och regler behöver styra bort plasten från förbränning (och deponi) och rikta den mot kemisk och mekanisk återvinning istället.**

Det är denna punkt som de allra flesta säger är viktigast. Då policyer och regler påverkar kostnader och avkastning både direkt och indirekt, så är det viktigt att kunna förutse vad som kommer ske de närmaste 5–10 åren och gärna längre. Osäkerhet menar man är det som är det värsta. Detta hämmar investeringar i anläggningar samt satsningar på forskning av nya tekniker. Man vill ha tydliga signaler om vad som troligtvis kommer ske och man behöver veta att det inte helt plötsligt dyker upp några nya hinder i form av ändrade regler.

¹⁷⁴ Chemical Recycling - Stakeholder consultation and feedback seminar 2/12

2. Tillgång på plastavfallsströmmar. De behöver säkerställas på lång sikt.

Detta handlar både om att hitta relevanta plastavfallsströmmar i praktiken och att säkra dessa för en långsiktig tillgång. Lämpligtvis så ska dessa strömmar hämtas från sådan plast som inte går, eller inte bör gå, till mekanisk plaståtervinning på grund av till exempel orenheter och giftiga/farliga tillsatser. Det är idag mycket plastavfall som går till avfallsförbränning, både från sådant som aldrig sorterades ut för återvinning till att börja med men också från sådant som sorterades ut som rejekt i den mekaniska återvinningsprocessen (se Figur 7). Det behövs riktlinjer och vägledningar om hur dessa strömmar bör tas om hand och sorteras för att återvinnas på ett resurseffektivt sätt. I vissa fall kan det till exempel vara lämpligare att sortera ut en större mängd mixad plast av låg/oren kvalitet som skickas till kemisk återvinning än att sortera ut en mindre mängd ren plast av hög kvalitet som skickas till mekanisk återvinning. Det finns idag projekt att sortera ut plastavfallet, exempelvis på Brista-anläggningen som SÖRAB driver i Stockholm. Genom att bygga och driva sådana utsorteringsanläggningar där plastavfallet sorteras ut från det övriga avfallet så ökar tillgången till plastavfall som kan gå till mekanisk plaståtervinning, samt olika sorters kemisk plaståtervinning. Man kan till exempel sortera ut plastavfall till olika plastsorter och därefter använda den återvinningsmetod som passar bäst för olika plastsorter. Det kan till exempel vara att kontaminerad eller färgad PET används för depolymerisering. Andra plastsorter kan passa för pyrolys/förgasning. Men byggs det ut tillräckligt mycket sorteringsanläggningar i stil med Brista-anläggningen? Hur får man tillgång till dessa plastavfallsströmmar? Det finns också ett behov av att ha långsiktig tillgång till plastavfallsströmmarna. De anläggningar för kemisk återvinning som byggs kräver stora kapitalinvesteringar och då behövs det att man långsiktigt får tillgång till råvaran, det vill säga plastströmmarna.

3. Det finns idag för få anläggningar för kemisk återvinning av plastavfall som är i drift i världen och dessa har också relativt liten produktionskapacitet.

Många av de stora kemiföretagen i Sverige och Europa vill gå över från fossil råvara till återvunnen och/eller biobaserad råvara. Det finns många initiativ på gång för kemisk återvinning, men få är byggda och produktionskapaciteten är begränsad. Ett hinder är alltså att det finns för lite återvunnen råvara och det tar tid att bygga upp kapaciteten. Det finns idag olika tekniker, både i det stora till exempel förgasning jämfört med pyrolys eller solvolys, men också i olika underkategorier inom till exempel pyrolys. Även om den här rapporten har fokus på återvinning av plast så kan solvolys, pyrolys och förgasning även anpassas för olika biomaterial, så som lignin, grot (grenar och toppar, ett skogsbränsle), däck eller blandat avfall. Det är viktigt att man får testa vilka av de olika varianterna som fungerar bäst i praktiken. Marknaden har ännu inte hunnit välja vilket, eller vilka, teknikspår som ska användas. I ett så tidigt skede är det viktigt att ge tekniken stöd vid investeringar, för att företagen ska våga investera i något som senare kan visa sig vara ett mindre lyckat teknikspår. Det behövs mer och fler ”early adopters” som kan hjälpa till att ta fram erfarenhet om hur tekniken fungerar i full skala och hur den kan integreras med lämpliga avfallsflöden och produktmarknader, så som plast eller kemikalier.

- 4. Det är viktigt att kemisk återvinning räknas som materialåtervinning och att det inkluderas i de mål som sätts för återvinning. Det är i dagsläget inte 100 % klart att kemisk återvinning räknas som återvinning. Varumärken vill ha biobaserat och/eller återvunnet, men det är fortfarande diskutabelt om kemiskt återvunnet räknas.**

Det finns en osäkerhet om kemisk återvinning verkligen räknas som materialåtervinning. Det räknas inte in i alla länder i Europa. I Sverige är regeringen tydlig med att kemisk återvinning är en möjlighet. Vad det gäller företag som tillverkar produkter så finns det blandade meningar om huruvida kemisk återvinning är en materialåtervinning eller ej. Det är lättare att förklara och förstå mekanisk materialåtervinning vilket skapar en osäkerhet i frågan. Kemisk återvinning är en metod som diskuteras på EU-nivå och om hur man ska se på kemisk återvinning och lägga in den i relevant lagstiftning. Inom EU-samarbetet pågår ett arbete att ta fram en ny plan ”Circular Economy Action Plan” (CEAP) som ej är klar och där det är viktigt att kemisk återvinning erkänns för att metoden ska accepteras. Sverige kan agera föregångare genom att stödja kemisk återvinning aktivt. Sverige kan också agera föregångare genom att vid offentlig upphandling erkänna kemisk återvinning som metod. Det är viktigt att sätta upp tydliga regler för i vilka fall som kemisk återvinning får räknas som materialåtervinning. Ska det till exempel endast räknas som materialåtervinning om slutprodukten är ett plastmaterial, eller kan även slutprodukter i form av kemikalier räknas in? I vilken utsträckning ska det vara godkänt att återvinnas som ett bränsle? I den beräkning av klimateffekter som presenterades i kapitel 7 förutsattes att producerad metanol eller nafta trängde undan en lika stor mängd fossilbaserad metanol eller nafta. Både metanol och nafta kan utgöra råvara till plasttillverkning och detta är grunden i vår beräkning av undanträngningseffekten och den därtill kopplade klimatnyttan. Men metanol och nafta kan också användas som drivmedel. Undanträngningseffekten och därmed klimatnyttan kan dock anses lika stor i detta fall. Men om man vill styra till materialåtervinning kan det kanske göras genom någon typ av certifikat. Det är dessutom inte tillåtet, enligt Waste Framework Directive (WFD), att räkna bränslen som materialåtervinning. Just frågan om vilka slutprodukter som ska räknas in i materialåtervinning eller inte är säkert en fråga som kan komma att diskuteras länge och det behövs mer studier på det området för att avgöra vad som är lämpligt. Det är också viktigt att sätta upp tydliga riktlinjer för hur mycket av plasten som ska räknas som återvunnen om den återvinns kemiskt. De riktlinjer som, än så länge, har ställts upp av EU har ingen tydlig mät punkt, beräkningspunkt eller beräkningsmetod för att rapportera mängden kemiskt återvunnen plast.¹⁷⁵

¹⁷⁵ European Commission 2020a

5. Lagstiftning och End of Waste. Det är i dagsläget osäkert när plastavfallet slutar vara ett avfall och det är oklart vilka regler som gäller vid REACH-registrering. Det är olika tillämpning av lagstiftningen i olika länder, vilket gör att det är osäkert vad som händer när materialet passerar en landsgräns.

För att få till effektiva anläggningar så måste plastavfallet ofta transporteras över landsgränser. Det är viktigt att veta vad som krävs för att plastavfallet ska sluta räknas som just avfall och istället blir en råvara. Det har nämnts att det är olika regler vad det gäller REACH-hantering när materialet passerar landsgränser inom EU. Vi har inte studerat denna fråga i detalj, men detta bör utredas vidare och hanteras. Anläggningar för kemisk återvinning behöver ha en viss storlek för att bli kostnads och miljömässigt effektiva. Som exempel så har västra Sverige nära till delar av Norge och Danmark, mycket närmare än till norra Sverige. Därför är det viktigt att man kan ha ett stort upptagningsområde för plastavfallet över landsgränserna. Vad det gäller ”mellanprodukter” som pyrolysolja, så behöver den i många fall transporteras över landsgränserna.

6. Tillståndsfrågan. Det tar lång tid att få tillstånd. Det är önskvärt om det räcker med ett ändringstillstånd istället för full prövning vid utbyggnad.

Det är viktigt, säger många, att tillståndsprocessen inte får ta för lång tid. Man menar inte att den ska göras dåligt, men processen är för tidsödande och oförutsägbar. Det är avgörande säger flera aktörer att man inte behöver göra en full prövning av hela anläggningen. Med hela anläggningen menas den som redan finns plus den nya tillbyggnaden för kemisk återvinning. Om det behövs en full prövning av hela anläggningen så innebär det en stor osäkerhet i och med att det kan komma nya krav också på den redan existerande anläggningen. Det pågår nu utredningar som ska undersöker tillståndsfrågan speciellt vad det gäller ”gröna” tillstånd, till exempel den som leds av Peter Ardö ”En modern och effektiv miljöprövning Dir. 2020:86”. Här finns en dialog med flera parter som arbetar med frågan om kemisk återvinning av plastavfall i Sverige. Dialogmöten planeras, där bland annat Västsvenska Kemi- och Materialklustret deltar. Det är mycket viktigt att tillståndsfrågorna kan hanteras effektivt och bra.

7. Massbalans och drop-in behövs.

I de fall då den återvunna råvaran går in i ett system där den blandas med (och därmed ersätter en del av) den fossila råvaran så kallas det drop-in. Det är på det viset som den huvudsakliga användningen, av framförallt nafta-liknande pyrolysoljor, sker idag. På så sätt behöver man inte bygga stora, nya och kostsamma separata processanläggningar för att hantera den återvunna råvaran. Man kan på detta sätt komma igång i liten skala och sedan gradvis öka inblandningen, när tillgången och tekniken tillåter det. Man har också möjlighet att bygga flera mindre pyrolys-anläggningar och skicka pyrolysoljan till en och samma cracker. Då behöver man inte transportera den skrymmande plasten så långt. Vi bedömer att ett system baserat på massbalans (eller liknande) är nödvändigt för att vissa delar av kemisk återvinning ska komma igång och fungera, men vi ser också att det finns potentiella problem med hur en massbalans kan byggas upp. Detta diskuteras mer i

avsnitt 9.3.4 *Trender i industrin.*

8. Finansiellt stöd och finansiering. Industriklivet accepterar både direkta och indirekta CO₂ utsläpp. Just för återvinningsåtgärder så vore det lämpligt om även indirekta utsläpp räknas med vid fler statliga finansieringar.

Det finns finansiella stödsystem för att underlätta övergången från fossila till förnybara/återvunna råvaror. Ett plastreturaffineri minskar växthusgasutsläppen jämfört med förbränning av plastavfall, under de förutsättningar som gjordes i kapitel 7 i den här rapporten, vilket bland annat innebär att den totala konsumtionen och sammansättningen av plast i samhället är oförändrad. En sådan minskning av utsläpp syns endast om man inkluderar både direkta och indirekta utsläpp i analysen. Med direkta utsläpp menas de utsläpp som sker i skorstenarna där själva plastreturaffineriet finns. Dessa utsläpp är olika stora beroende på om det är till exempel pyrolys eller förgasning som används och de utsläppen är större än om plastreturaffineriet inte hade funnits. Med indirekta utsläpp menas den effekt på utsläpp som sker på andra platser. Tar man plastavfall som skulle ha förbränts i en avfallsförbränningsanläggning och transporterar det till ett plastreturaffineri så minskar CO₂-utsläppen i avfallsförbränningsanläggningen, förutsatt att det ersätts med ett bränsle som har lägre andel fossilt material. Detta är exempel på indirekta utsläpp. Det är viktigt att man tar hänsyn till både de direkta och de indirekta utsläppen så att man ser på nettoeffekten. Industriklivet gör det nu. Det verkar som om andra stödsystem inte alltid tar med de indirekta utsläppen, vilket skulle vara önskvärt just för återvinningsåtgärder.

9. I dagsläget är det brist på marknadsdrivkrafter. Kvotplikt på återvinning av plastavfall och kvotplikt på återvunnet material i nya plastprodukter kan hjälpa till att öka efterfrågan.

Många pratar om incitament för att öka användningen av återvunnen råvara i våra produkter. Ingen vet riktigt hur ett sådant styrsystem ska se ut, men många tror att det vore effektivt. Man jämför bland annat med reduktionsplikten för fordonsbränsle och vi har sett under det här projektets gång hur en efterfrågan på förnybara drivmedel driver på utvecklingen av bland annat förgasning av biomassa och avfall som delvis innehåller biomassa. EU har nämnt i handlingsplanen för den cirkulära ekonomin¹⁷⁶ att kommissionen kommer att ”föreslå tvingande krav på innehåll av återvunnet material” i plastprodukter, såsom förpackningar, byggnadsmaterial och fordon. En risk med krav på innehåll av återvunnen råvara i plastprodukter är att det kan skapa en efterfrågan på produkter som är antingen onödiga eller ersätter något annat lämpligare material. Detta kan till exempel ske om kvotplikten sätts som ett genomsnitt av vad som sätts på marknaden. Om kvotplikten sätts som en tvingad andel i alla produkter så kommer det uppstå svårigheter mellan inhemska och importerade varor. Det kommer också troligtvis behövas olika nivåer för olika produkter då de har olika potential att ta in återvunnet material (jämför till exempel en blomkruka med en matförpackning).

¹⁷⁶ European Commission 2020b

Det finns redan krav på hur stor andel av plastförpackningarna som måste återvinnas och det finns återvinningskrav på flera andra produkter också, men det är sällan något specifikt återvinningskrav på just mängden plast i de produkter som innehåller flera material. Som vi såg i kartläggningen av plastavfall, kapitel 6, så finns det mycket plastavfall som går till förbränning idag. En risk med krav på andelen plastprodukter som återvinns är att de återvinns till lågvärdiga produkter och ibland att de återvinns till produkter som inte behövs i samhället eller i alla fall inte behöver göras av plast. Det skulle i princip kunna ställas kvalitetskrav på återvinningen också, men vi misstänker att det kan vara svårt att införa och/eller svårt att kontrollera.

Ett införande av krav på mängden återvunnen material som (vissa) nya plastprodukter innehåller kommer öka efterfrågan och därmed priset på den återvunna råvaran. Ett ökat krav på andelen plastavfall som återvinns ökar dessutom efterfrågan på fungerande återvinningslösningar och ger dessa lösningar en möjlighet att ta ut en så kallad "gate fee". Båda dessa åtgärder gör alltså att kemisk och mekanisk återvinning lättare kan konkurrera med den jungfruliga fossila plasten. När sådana krav införs så är de dessutom oftast långsiktiga, vilket stämmer väl in på punkt 1 i denna lista. Vid införandet av dessa kvotplikter så är det viktigt att dessa kopplas till punkterna 4 och 7 i denna lista, så att kemiskt återvunnen plast också räknas som återvunnen och att det finns ett accepterat system för massbalans som kan beräkna hur mycket som faktiskt återvinns via kemisk återvinning. Marknaden kommer vilja ha den kemiskt återvunna plasten, då den i många fall är som ny, men ändå återvunnen. Det kommer dock behövas ett vedertaget sätt att kommunicera vad den kemiskt återvunna plasten är för något, för de aktörer som vill marknadsföra den.

10. Logistik-kedjor. Det krävs sorterings- och uppsamlings-anläggningar som kan hantera och processa plastavfallströmmarna och hantera logistiken. Det behövs investering i infrastruktur.

Plastavfallet uppstår på många olika platser och i en mängd olika former. Både vad det gäller olika plasttyper, men också i olika former och storlekar. Det man behöver är logistiklösningar. Plastavfallet behöver behandlas så att det blir hanterbart, till exempel genom storleksminskning, krossning, pelletering. Man kan också tänka sig lokala mindre pyrolys-anläggningar. En del plastavfall är "fluffigt" och skrymmande. Det kan behövas lokala omlastningspunkter där det fluffiga och skrymmande plastavfallet görs mer hanterbart. Från dessa omlastningspunkter så kan man tänka sig en eller ett par centrala anläggningar som sorterar och behandlar plastavfallet så att det kommer i rätt platsorter och form, både för kemisk och för mekanisk återvinning. Plastavfallet är i många fall sammansatt med andra material såsom trä, metaller mm. Fordon och elektronik är typiska sådana exempel. Logistiklösningar innebär:

- Transport med lastbil, järnväg, båt med mera.
- Lagring.
- Styrning av detta i form av management, IT-lösningar med mera.

Här behövs infrastrukturlösningar och kunskap om de olika återvinningslösningarna så att olika typer av plastavfall kan återvinnas på ett så effektivt sätt som möjligt. Detta kommer att förändras med tiden då den tekniska utvecklingen går framåt inom de olika

områdena. Inom många områden så står det offentliga för infrastrukturen. Det gäller ju allmänna vägar, tågtrafik, broar med mera. Vi tror inte att staten bör äga och driva hela logistiken inklusive sorterings- och uppsamlings-anläggningar, men staten bör vara med och stötta uppbyggnaden av infrastrukturen. Det behövs för att påskynda återvinning av plastavfall. Då får man både ökad mekanisk återvinning och kemisk återvinning av plastavfall.

8.2 Styrmedel

Ett flertal styrmedel påverkar redan plastmarknaden, vilka listas nedan:

- Krav på sortering av bygg och rivningsavfall.
 - Borde leda till att mer plast sorteras i tillräckligt rena fraktioner för att kunna återvinnas kemiskt eller mekaniskt.
- Avfallsförbränningsskatt.
 - Den uppmuntrar i dagens utförande inte till utsortering av plast innan förbränningen, då priset är satt per ton avfall (oavsett material) och plasten innehåller mycket energi per vikt.
- CO₂-skatt eller utsläppsrätter.
 - En kostnad på att släppa ut fossil koldioxid gör det mer attraktivt att utnyttja plasten/koldioxiden till något annat. Vi har i det här projektet fått höra att handeln med utsläppsrätter för avfallsförbränningsanläggningar inte hanteras likadant i alla EU-länder, att svenska anläggningar behöver betala för sina utsläpp medan i vissa andra länder så slipper anläggningarna den kostnaden. Vi har inte undersökt saken närmare. Däremot kan vi säga att det är synd om det inte görs likadant i alla länder. Det är också bra om annan avfallshantering, så som deponi och kemisk återvinning har likvärdiga krav som avfallsförbränning. Det är olämpligt om osorterad (eller lågvärdig) plast skeppas till länder där det är billigt att bränna plasten istället för att återvinnas kemiskt eller mekaniskt.
- Deponiförbud/deponiskatt.
- Förbud mot att förbränna plast som utsorterats för materialåtervinning.
- Återvinningskrav på plastförpackningar.
- Återvinningskrav på andra material (så som WEEE, ELV, bygg- och rivningsavfall).

Kraven ökar incitamenten för att återvinna en större andel av dessa material. Dessa krav är dock endast satta utifrån totala massan, inte för specifika material. Det leder till att material med hög densitet prioriteras högre vid återvinning, men ger låg effekt på den lätta plasten. Löst ställda återvinningskrav riskerar att driva på en återvinning av billiga material som är enkla att återvinna, där fokus är på att återvinna en så hög andel som möjligt utan att ta kvalitet i beaktande. Vi ser exempel på det i många branscher där inerta material som betong, sten och glas återvinns som byggnadsmaterial på deponier, att högvärdiga metallegeringar tas ut som en lågvärdig mix och att plast återvinns som lågvärdiga bullerplank, krukor, slipers och annat där plasten ofta ersätter ett annat material än just plast. Om den nya plastprodukten är klart bättre än ursprungsprodukten så kan det finnas en mening i att byta ut materialet, men om de är ungefär likvärdiga så är det tveksamt om en sådan återvinning ger någon miljönytta.
- Kvotplikt för bränslen.

- Kvotplikten för bränslen gör också att de tekniker som kan ta in biologiskt material (så som förgasning och CCU) blir mer attraktiva än vad de hade varit annars.
- Baselkonventionen
 - Gör det lättare att exportera rena plastavfall (bestående av enstaka polymerer) än att exportera mixade plastavfall.

Flera styrmedel skulle kunna anpassas för att göra den (mekaniskt eller kemiskt) återvunna plasten mer attraktiv:

- Det har bland annat nämnts att den kemiska återvinningen måste ses som en riktig återvinning, kanske inte att 100 % av den ingående plasten blir återvunnen men i alla fall att det utgående materialet ska ses som en återvunnen produkt.
- Avfallsförbränningsskatten skulle kunna omarbetas så att det blir billigare att bränna avfall som har gått igenom en sorteringsprocess, där plasten (och eventuellt något annat material så som exempelvis metall) har separerats bort i förväg. Det räcker inte med att det går att göra avdrag för det bortsorterade återvinningsbara materialet som förs ut från anläggningen, eftersom en anläggning troligtvis kommer behöva ta in annat material för att kompensera för det som togs ut, eftersom värmen fortfarande behöver levereras.
- Om det stämmer att avfallsförbränningen inte inkluderas i EU:s utsläppssystem (EU ETS) i alla medlemsländer, så skulle det kunna vara lämpligt att försöka inkludera det i alla medlemsländer. Det är lämpligt att försöka få till att förbränning av plast behöver betala för sina CO₂-utsläpp i form av utsläppsrätter eller liknande, samtidigt som man jobbar på att göra det återvunna materialet mer efterfrågat. Ur ett svenskt perspektiv så skulle en sådan förändring kunna leda till att det blir mindre attraktivt att exportera blandad plast till andra EU-länder där de värdefullaste plasterna sorteras ut, varefter resten förbränns. Istället kan det bli mer attraktivt att sortera plasten inom Sverige och skicka restmaterialet till kemisk återvinning. En risk med att öka kostnaden för avfallsförbränning på det här sättet är att det även gör andra alternativ som deponi och dumpning mer attraktiva, vilket i så fall måste hanteras.
- En tydlig sak som framkom från intervjuer och workshop var att det behövs långsiktighet. Företag som investerar i dessa anläggningar behöver veta vilka ersättningsnivåer de kan förvänta sig långt fram i tiden. Det kan alltså sägas att stöd i byggprocessen är attraktivt för att välja en plats över en annan, men det som önskas mest är tydliga policyer och regler som inte riskerar att ändras allt för mycket fram och tillbaka.
 - Regler där det behövs tydlighet berör bland annat:
 - End of waste. När slutar ett avfall vara avfall. Det är tyvärr inte likstämmt inom alla EU-länder. REACH-registreringen är också lite oklar. Se punkt 15 i avsnitt 8.1 för ytterligare beskrivning.
 - Inkludera kemisk återvinning i återvinningsmål. Det är fortfarande diskutabelt om kemisk återvinning räknas som återvinning och det kan variera mellan olika länder i EU. Det krävs en tydlig standard som visar på vilket sätt det ska räknas (mätpunkter, återvinningsgrad osv.) när kemisk återvinning inkluderas. Se punkt 14 i avsnitt 8.1 för ytterligare beskrivning.

- Tillståndsfrågan. Det verkar som att det finns otydligheter omkring hur besvärlig en tillståndsprocess kommer bli. Se punkt 16 i avsnitt 8.1 för ytterligare beskrivning.
- Massbalans eller spårbarhet. Mycket av den kemiska återvinning som finns och är på gång sker genom så kallad drop-in, det vill säga att man blandar in återvunnen råvara med den fossila. Det kan vara lämpligt med tydlighet om vad som är, eller inte är, acceptabelt i en sådan beräkning. Se punkt 17 i avsnitt 8.1 för ytterligare beskrivning.
- Utöver tydlighet så behövs långsiktiga ersättningsnivåer, en långsiktighet i tillgång och efterfrågan:
 - Genom att inkludera kemisk återvinning i återvinningsmål så visas det hur stor/liten risk det är att tillgången plötsligt stryps av exempelvis förbud mot kemisk återvinning av vissa plaster. Se punkt 14 i avsnitt 8.1 för ytterligare beskrivning.
 - Efterfrågan kan ökas genom att exempelvis kräva att nya produkter måste innehålla en viss andel återvunnet, eller genom att fossil råvara blir dyrare än återvunnen råvara genom olika styrmedel. Se punkt 19 i avsnitt 8.1 för ytterligare beskrivning.

9 Diskussion och slutsatser

Diskussionen utgår från de frågor som ställdes i början av projektet.

9.1 Problem och hinder som kan lösas i plastflödet med kemisk återvinning

Det primära problemet i plastflödet som kemisk återvinning skulle kunna lösa är att ta hand om den plast som mekanisk återvinning inte kan hantera och på så sätt hindra den plasten från att gå till förbränning eller deponi. Dessutom kan kemisk återvinning hjälpa till att få fram högvärdiga produkter av återvunnet material, vilket den mekaniska återvinningen inte klarar av där den återvunna produkten alltid är av samma eller sämre kvalitet än det ingående materialet.

9.1.1 Hantera plast som mekanisk återvinning inte klarar av

Idag återvinns rena avfallsströmmar av plast med mekanisk återvinning. En förutsättning för mekanisk återvinning är en hög renhet, utan kontaminerande plaster, tillsatser, fibrer och fyllmedel. Detta krav uppfylls inte i flera plastavfallsströmmar och därför är de inte lämpliga för mekanisk återvinning. Så kallat ”besvärliga” plaster som ofta nämns som potentiella för kemisk återvinning är flerskikt (laminat), färgad plast och annan plast med diverse tillsatser. Från våra intervjuer har vi förstått att en plasttyp med låg efterfrågan är bland annat LDPE från förpackningar, då den ofta är förorenad av andra plaster och tillsatser. Vi förstod också att det är stor skillnad i pris mellan ofärgade, transparenta, PET-flaskor och andra PET-förpackningar. PET-tråg (för exempelvis kött) är en fraktion som ofta innehåller andra plaster och tillsatser. Färgad PET har lägre pris då det inte går att färga om plasten och om olika färger blandas så blir det en grå färg, som visserligen går att ändra till svart. Där är det helt klart tillsatser och orenheter som sänker priset. Även PS har lågt värde, men det är lite oklart varför. En hypotes kan vara att frågan har varit mindre aktuell bland PS-användare och att det därför finns för låg efterfrågan på återvunnen råvara till PS-framställning.

Många av dessa flöden med lågt (eller negativt) försäljningsvärde har bra potential att kunna återvinnas med hjälp av kemiska metoder. Sorterade PET-förpackningar med färg eller andra orenheter kan renas upp med hjälp av exempelvis upplösning/utfällning eller depolymerisering, där slutprodukten blir en ren PET som kan användas till förpackningar och därmed bilda ett slutet kretslopp av PET. En del av den rejekt som kommer från sorteringen av plastförpackningar skulle kunna sorteras vidare för att exempelvis återvinnas genom solvolys eller pyrolys för att omvandlas till en olja, nafta eller annan flytande produkt som ersätter fossil råvara i raffinaderi eller annan kemisk process. Den vägen är också öppen för en del av den LDPE och PS som har för lågt värde på återvinningsmarknaden idag. Den plast som går som restavfall i dagläget kan också sorteras ut för att gå till solvolys eller pyrolys. Det kommer i så fall kräva stora investeringar i anläggningar som kan sortera ut plast från restavfallet och eventuellt även anläggningar som kan sortera och kanske tvätta eller på annat sätt rena det ytterligare innan det återvinns kemiskt. Liknande potential, att sortera diverse flöden och göra dem attraktiva för återvinning via solvolys eller pyrolys, finns i de flesta andra plastströmmar i samhället, men även där skulle det krävas ytterligare sortering för att lämpa sig för solvolys eller pyrolys. I vissa fall är det lämpligt med en sortering som genomförs redan av slutkunden innan det skickas iväg som avfall, i andra fall kan det vara lämpligt med en mekanisk separering i efterhand, exempelvis

genom att låta blandat plastavfall gå igenom en densitetsseparation där framförallt polyolefinerna (PE och PP) kommer flyta samtidigt som övrig plast sjunker. Att använda sig av densitetsseparation av några av de restströmmar som redan finns skulle på ett relativt enkelt sätt sortera ut den plast som är mest attraktiv för de pyrolysanläggningar som startas i dagsläget.

I stället för att sortera plasten ytterligare kan man använda sig av förgasning, där en mix av plast, biomaterial och diverse avfall skulle kunna omvandlas till metan, metanol eller andra lättare molekyler. Den rejekt som uppkommer vid återvinningen av vätskekartong är en sådan ström som troligtvis skulle vara allt för besvärlig att rengöra för att skicka till pyrolys, då den till stor del består av cellulosa fibrer blandat med plast och ibland aluminium. Där skulle exempelvis förgasning passa bra om det finns en sådan anläggning tillräckligt nära. Den fraktionen är dock alldeles för liten för att (ensam) motivera en sådan investering. Då förgasning kan hantera en mer blandad materialström så finns det en betydligt större mängd plast som skulle vara lämplig för förgasning än för exempelvis depolymerisering, solvolys och pyrolys, men det är samtidigt en ineffektivare process för de något renare plastströmmarna. Samtidigt ser vi också att marknaden, i det skede den befinner sig i just nu, verkar föredra processer som bryter ner plasten till en flytande produkt lik olja eller nafta.

9.1.2 Skapa högvärdiga produkter av återvunnet material

Vid mekanisk återvinning så smälts plasten ner och skapar en blandning av det material som gick in i smältprocessen. Den återvunna produkten är alltid av samma eller sämre kvalitet än det ingående materialet. Många tillsatser, som mjukgörare och färger, följer med i blandningen. Likaså för en stor del av de polymer-molekyler som delvis har brutits ned av till exempel åldrande, kemikalier eller UV-ljus. Vid kemisk återvinning så kan dessa orenheter plockas bort och/eller destrueras. Vissa undantag finns dock, vilket bland annat syntes i Vinyloop-processen som beskrevs i avsnitt 4.2.8, men med rätt val av teknik så kan det skapas giftfria cirkulära flöden från material som från början var giftiga. Genom att generalisera grovt och utan att ta hänsyn till de eventuella sorterings- och tvättprocesser som de olika teknikerna kräver så kan man lite kort sammanfatta det enligt följande:

- Mekanisk återvinning kan på ett *effektivt* sätt återvinna plastflöden av *hög* kvalitet till plastmaterial av något eller betydligt *lägre* kvalitet.
- Kemisk återvinning kan på ett *mindre effektivt* sätt återvinna plastflöden av *lägre* kvalitet till plastmaterial av *högre* kvalitet.

De har på så sätt en bra potential att komplettera varandra.

9.2 Flöden där kemisk återvinning skulle göra mest nytta

Stora flöden har potential att ge stor nytta. Flöden med lågt värde inom mekanisk återvinning har potential att vara attraktiva för kemisk återvinning.

Det enskilt största flödet av plast som identifierades i den här studien (kapitel 6) fanns i det avfall som importeras till förbränning. Där finns en stor potentiell nytta, men det flödet borde troligtvis sorteras redan i hemlandet i så fall. Var den utsorterade plasten från det flödet i så fall kommer återvinnas (mekaniskt/kemiskt) är inte undersökt i den här studien, men det kommer troligtvis inte ske i Sverige såvida det inte byggs en enorm återvinningskapacitet som inte kan mättas från de inhemska flödena. En större utsortering av plast från det materialet kan däremot leda till

minskade klimatutsläpp från svensk avfallsförbränning genom att den fossila andelen i det importerade materialet minskar.

Några övriga stora flöden som identifierades är blandat avfall från verksamheter, bygg- och rivningsavfall, restavfall, grovavfall och utsorterade förpackningar. En stor del av dessa fem flöden består av polyolefiner i form av PE och PP, vilket är ett attraktivt material för bland annat pyrolysanläggningar. Troligtvis så finns det också en stor potential att öka den mekaniska återvinningen från dessa flöden. Från de flöden som redovisas i Figur 7 och de polymersammansättningar som redovisas i Figur 8, samt ett antagande att mängden plast från blandat avfall från verksamheter består till ca 50 % av PE eller PP, så kan vi dra slutsatsen att det finns i dessa fem flöden en total mängd av ca 400 000 ton polyolefiner varje år som inte återvinns i dagsläget. Det motsvarar ungefär åtta gånger mer plast än vad som i dagsläget kan sorteras ut till återvinning från Svensk Plaståtervinning eller åtta gånger mer plast än vad Borealis siktar på för en pyrolysanläggning i Stenungsund.

En aspekt som man måste ha i beaktande är att olika lagar och styrmedel som till exempel förpackningsdirektivet kommer ändra sammansättningen och storleken på olika plastflöden, till exempel förpackningar. Mer cirkulär design kan flytta flödet till mekanisk materialåtervinning till exempel genom att flerskiktsförpackningar byts till en monoplastprodukt. En annan vanlig lösning är att ersätta laminerade flerskiktsförpackningar med en kombinerad papper/plastförpackning. Dessa är idag svåra att sortera i plastsorteringsanläggningar och kan hamna i rejektfraktioner om papperssidan scannas i sorteringsanläggningen.

För att utvinna polymerer eller bryta ned polymeren till sina kemiska byggblock med kemisk återvinning (upplösning, depolymerisering och lågtemperatur-solvolys) krävs att en process utvecklas för ett anpassat avfallsflöde som har en eller flera huvudkomponenter (polymerer) som återvinns. Därför finns ett behov av försortering av avfallet. Idag finns befintliga sorteringsanläggningar som sorterar ut plastavfallet, till exempel elektronik- och kabelplast (Stena Recycling), och som behöver hitta annan avsättning än förbränning för sina sorterade fraktioner. Det finns också sorteringsanläggningar som kan utökas med ytterligare sortering, till exempel grovt avfall och hushållsavfall (under utveckling Stockholm Exergi). Utöver detta finns det behov av att utveckla nya logistikkedjor och sorteringsanläggningar för att öka återvinningsgraden från plastavfall som ej sorteras idag, till exempel bygg- och fordonsavfall. Genom utökad plastavfalls-sortering av hushållsavfall (restavfall) och på befintliga återvinningsanläggningar (grovavfall) kan man få ut avfallsflöden där kemisk återvinning skulle kunna appliceras på plastströmmar mindre lämpliga för pyrolysis/förgasning som:

Polystyren (PS)

PS finns i tre dominerande avfallsströmmar idag: restavfall (hushåll, PS), grovavfall (återvinningsanläggningar, PS/ABS) och elektronikavfall (PS/HIPS/flamskyddsmedel). En uppskattning är ca 24 000 ton, varav en okänd mängd återvinns mekaniskt idag. För den delen som inte återvinns mekaniskt är det lämpligt att utveckla ett koncept där PS återvinns genom kemisk återvinning via upplösning/utfällning, depolymerisering och lågtemperatur-solvolys. Det finns pilotanläggningar där PS och flamskyddsmedel har påvisats kunna separeras så att man återfår fungerande utgångsmaterial.

Polyetereftalat (PET) och polyester

PET är en polymer som idag återvinns mekaniskt, det vill säga PET från flaskor som sedan återanvänds till andra PET- och polyesterprodukter. Färgad plast är inte lika attraktiv för mekanisk återvinning på grund av de många olika färgtillsatserna. Det finns en möjlighet att kemiskt återvinna färgade PET- och polyesterprodukter med upplösning/utfällning eller depolymerisering vid lägre temperaturer. Genom denna återvinning erhålls en återvunnen monomer (kemiskt byggblock i polymeren) eller polymer som har likvärdig kvalitet som ny fossil PET-råvara. Eftersom alla föroreningar separeras kan dessa återvunna monomerer och polymerer användas för livsmedelsförpackningar. Mekaniskt återvunnen PET är endast möjligt att återvinna som livsmedelsförpackningar om det är garanterat fritt från föroreningar, vilket i praktiken endast fungerar för flaskor som samlas in via pantsystemet. I Sverige uppskattas det till att 70 000 ton PET-avfall finns tillgängligt, varav 45 000 ton finns i redan källsorterat förpackningsavfall och flaskor och ytterligare 24 000 ton bedöms kunna sorteras ut från en utökad sortering av rest- och grovavfall. Här finns en möjlighet att bygga upp en kemisk återvinningsprocess. Dessutom så kan denna typ av process utvecklas ihop med en liknande process för till exempel syntetisk PET (polyester) från textilt avfall.

Fordon

Återvinning av fordon, lättare än 3,5 ton, lyder idag under ELV-direktivet och måste därmed materialåtervinnas till minst 85 %, vilket också inkluderar återanvändning av exempelvis reservdelar. Andelen tyngre fordon är betydligt lägre och har troligtvis en någorlunda liknande plastsammansättning, så de antas i det här exemplet behandlas på liknande sätt. Fordonen går idag först till demontering där vissa reservdelar plockas ut tillsammans med däck, glas, batterier, oljefilter och katalysatorer. Fordonen töms också på alla vätskor. Efter detta återvinns fordonen med fragmenteringsmetoden till uppsatta ELV-mål, där framförallt metaller sorteras ut för materialåtervinning med hjälp av magneter och virvelströmsseparatorer. Fordonsplasten som är av låg vikt av totala fordonet går huvudsakligen till energiåtervinning, men för att uppnå ELV-målet på minst 85 % materialåtervinning så måste en del av plasten också återvinnas. Alla fordonskomponenter är av hög kvalitet och spårbara genom tillverkarnas databaser. Här finns en möjlighet att plocka ut specifika detaljer vid bildemontering och återvinna högkvalitativa polymerer, dessa polymerer kan exempelvis selektivt återvinnas tillbaka till fordonstillverkning efter lämplig mekanisk/kemisk återvinning (closed-loop recycling). Exempel på polymerer och dess blandfraktioner är: PP, PE, PA6/PA66, PC+ABS, ABS, PC, PMMA, PVC och POM. Polymerer av typ PP (ca 15 000 ton, varav ca 5000 ton fylld PP), PE (ca 8000 ton) och PA6/PA66 (ca 8000 ton) är de större volymerna från fordonsåtervinning. I denna sektor är delvis redan logistik och demonteringsanläggningar på plats för att återvinna metaller. Denna skulle kunna utökas för att även återvinna polymerer från plastkomponenter. Idag är dessutom fordons-tillverkare angelägna om att implementera återvunna polymerer i sina fordonskomponenter för att få en högre hållbarhetsprofil.

9.3 Hinder och möjligheter med införandet av kemisk återvinning

9.3.1 Bör bara vissa plaster få gå till kemisk återvinning, behöver det regleras?

Vi tror inte att det vore lämpligt att sätta någon reglering på vilka specifika plasttyper eller plastflöden som får eller inte får gå till kemisk återvinning. Man får ta det i beaktande när man sätter styrmedel, men det lär inte behövas sättas några förbud mot kemisk återvinning av några specifika plasttyper eller plastflöden. Däremot kan det vara lämpligt med olika incitament som hjälper marknaden att ”välja rätt”. Vi tror det är lämpligare att reglera hur mycket av den totala mängden plast som måste återvinnas på något sätt och hur mycket av den producerade plasten som måste komma från återvunnen (eller förnybar) råvara.

Mekanisk återvinning är billigare och är, ur miljö- och klimatsynpunkt, lämpligare än kemisk återvinning, i alla fall då det handlar om någorlunda rena flöden som kan återvinnas till ett högvärdigt material. Tyvärr leder den mekaniska återvinningen ofta till så kallad down-cycling, att det återvunna materialet har lägre kvalitet än det ursprungliga. Ett scenario med hög återvinningsgrad, men endast mekanisk återvinning, leder oundvikligt till att all plast vandrar neråt i kvalitetskedjan och ackumuleras i produkter med låg kvalitet, samtidigt som det måste fyllas på med nytt jungfruligt material längst upp i kvalitetskedjan. Med kemisk återvinning finns det möjlighet att lyfta upp materialet från botten till toppen av kvalitetskedjan, med en del förluster på grund av en återvinningsgrad som är lägre än 100 %.

En vanlig ekonomisk modell runt återvinning är att ta in ett så billigt material som möjligt och arbeta upp det till en nivå som ger ett så högt pris som möjligt i slutändan, med olika avvägningar för hanteringskostnader och så vidare. Eftersom kemisk återvinning har möjlighet att plocka ett billigare material som befinner sig längre ner i kvalitetskedjan så kommer det också vara det materialet som i första hand går till kemisk återvinning. Rena fraktioner kommer vara dyrare och kommer därför huvudsakligen gå till mekanisk återvinning. Det kommer uppstå en viss konkurrens mellan mekanisk och kemisk återvinning om det material som ligger en bit ner i kvalitetskedjan, men det kommer troligtvis att regleras med tillgång och efterfrågan kombinerat med en lång rad av styrmedel (se kapitel 8 för en detaljerad genomgång av befintliga och föreslagna styrmedel).

9.3.2 Synergieffekter mellan mekanisk och kemisk återvinning

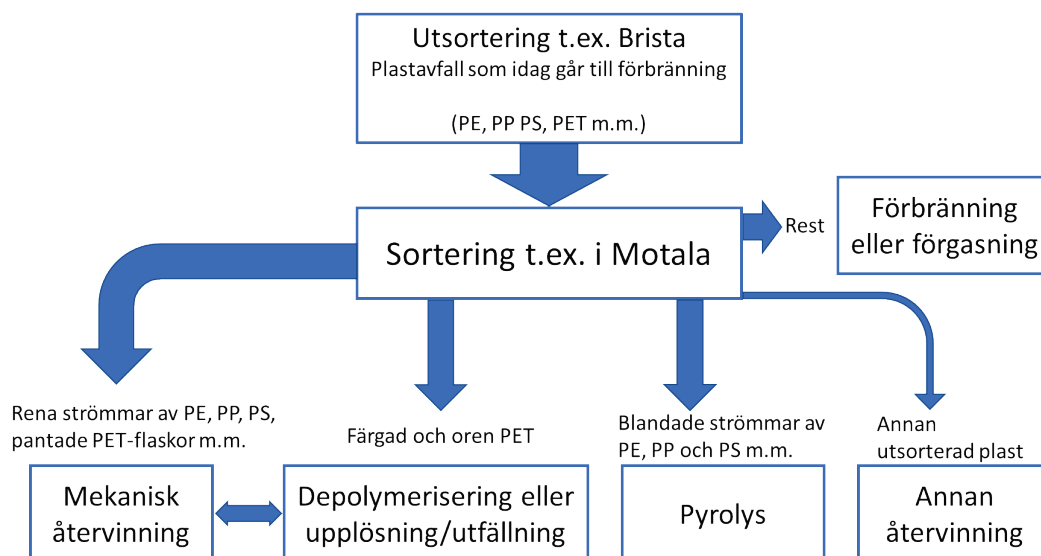
Idag är det mycket plastavfall som förbränns tillsammans med övrigt avfall i avfallsförbränningsanläggningar där energin i materialet tillvaratas i form av värme och elektricitet. Idag byggs det sorteringsanläggningar för att sortera ut plast från restavfallet som annars skulle gå till förbränning i avfallsanläggningarna, till exempel i Brista i Stockholm. Vid sådana anläggningar för eftersortering finns det en stor potential att utöka den totala mängden plast som sorteras ut för återvinning i Sverige. Plastavfallet kan sedan sorteras ytterligare och i fallet från Brista så ska det gå till Svensk Plaståtervinnings anläggning i Motala. Där ska det utsorterade plastavfallet sorteras i olika fraktioner. I Motala sker det investeringar i ny sorteringsutrustning för att göra detta ytterligare effektivt. Man har nu fått beviljade medel för att göra detta från Klimatklivet¹⁷⁷. Här

¹⁷⁷ SVT 2020

säger man att ”Det ena projektet som får pengar via Klimatklivet syftar till att sortera ut fem typer av plast som tidigare inte gått att återvinna och det andra till att kunna återvinna de typer av plast som idag går till förbränning”. Det har inte annonserats vilka typer av plast som kommer sorteras ut, men utifrån intervjun vi hade innan dessa beviljade medel annonserades så är det troligt att PS, PP-film och färgad PET ingår.

Ett mål med de förändringar av styrmedel som presenterades i kapitel 8 är att det ska bli ekonomiskt lönsamt att kemiskt återvinna plastavfall som annars skulle förbrännas. Det ska löna sig att sortera ut mer plastmaterial från de strömmar som i dagsläget går till förbränning. Det material som av olika anledningar inte är attraktivt att återvinna mekaniskt ska dessutom, i genomsnitt, vara billigare att skicka till kemisk återvinning än att skicka till förbränning. Om det målet är uppfyllt så kommer den totala mängden plast som sorteras ut för återvinning att öka. Den ökningen har illustrerats som ”utsortering t.ex. Brista” i Figur 13, men kommer troligtvis även att utgöras av ökad utsortering även i tidigare led, så som via ökad källsortering hos hushåll, industri och annan verksamhet. I det efterföljande sorteringssteget, som till exempel skulle kunna vara en anläggning lik den som Svensk Plaståtervinning har i Motala, så kommer troligtvis *andelen* material (mäts som procent) som går till mekanisk återvinning *minska* jämfört med idag. Men då det totala inflödet har ökat så kommer (i det här scenariot) även den totala *mängden* material (mäts i ton/år) som går till mekanisk återvinning *öka*. Detta är ett exempel på hur kemisk och mekanisk återvinning faktiskt kan hjälpa varandra, samtidigt som de ändå konkurrerar om vissa delar av materialet. De kan hjälpa varandra eftersom de så att säga ”slås mot en gemensam fiende” i form av förbränning, deponi och dumpning.

Ett exempel på hur mängden material till mekanisk återvinning kan öka är från den PET-plast som inte ingår i pantsystemet för PET-flaskor. De bästa delarna av denna fraktion kan gå till mekanisk återvinning, medan övriga delar kan gå till upplösning/utfällning eller depolymerisering. Här pågår det studier för att studera hur en sådan hantering och återvinning skulle kunna ske i praktiken. En studie är startad i Vinnväxtingsnningen Klimatledande Processindustri för detta. Mängden av de två vanligaste plasterna i vårt samhälle, PE och PP, som skickas till återvinning kommer också att öka. Återigen kan sorteringen fokusera på de bästa delarna, som ger bäst pris, för mekanisk återvinning. Delarna med sämre kvalitet, som till exempel är blandat med annan plast i flera skikt, kan gå till pyrolys i en mixad fraktion av PE, PP och en del övrigt material. Det finns också många andra fraktioner som kan sorteras ut, både för mekanisk och för kemisk återvinning, vilket enkelt sammanfattas som ”annan utsorterad plast” i Figur 13. Det kommer också att uppstå en restfraktion som inte passar till någon av dessa återvinningsmetoder. Den fraktionen skulle till exempel kunna gå till förgasning, eller till förbränning som har potential att kopplas till CCU.



Figur 13. Schematisk bild som illustrerar en möjlig framtida situation med utsortering av plastavfall med vidare återvinning av olika slag.

Genom att sortera ut plastavfallet innan det går in i avfallsförbränningen så ökar den plastavfallsström som sedan ytterligare sorteras för att få fram andra typer av polymerer som kan återvinnas mekaniskt. Det material som går till mekanisk återvinning har då potential att ha högre kvalitet än det har i dagsläget. Samtidigt uppstår ett antal strömmar av lägre kvalitet som passar för kemisk återvinning. Det blir också en restström som i den närmaste framtiden troligtvis går till förbränning, men på sikt kan gå till förgasning eller förbränning med CCU. Synergieffekterna är att genom att bygga ut infrastrukturen på detta sätt både stärker mekanisk återvinning och kemisk återvinning av plastavfall. Man kan ta ut miljö- och ekonomiska vinster från båda hållen.

9.3.3 Risk för negativa effekter?

Visst finns det risk för negativa effekter. Olika former av fusk och illegal avfallshantering är en risk om styrmedel sätts in långt ner i värdekedjan, särskilt om det är styrmedel som fungerar som ”piskor”, det vill säga förbjuder eller fördyrar något. Om det blir dyrt eller besvärligt att ta hand om avfallet på ett bestämt sätt så finns det en risk att det leder till att fler fuskar, exempelvis genom att materialet dumpas, sätts i brand eller skickas utomlands till en mer tveksam återvinning. Om det istället är lätt att göra rätt så blir det troligen färre som fuskar. Styrmedel högre upp i värdekedjan är ofta efterfrågade från avfallsbranschen, vilket är befogat då det blir lättare att exempelvis återvinna ett material som är designat för att vara återvinningsbart. Om det sätts krav redan vid design eller inköp/upphandling av en produkt så är det lättare att minska, återanvända och återvinna avfallet.

Det finns också en risk att en ökad tillgång på kemisk återvinning kommer legitimera fler plastprodukter som är svåra att återvinna mekaniskt, exempelvis flerskiktspackningar. Det är å andra sidan en trend som vi ser redan i dagsläget ändå, så det visar snarare på ett behov av att utveckla tekniken för att återvinna dessa flerskiktspackningar. Det finns möjlighet att delvis styra bort från den typen av produkter genom producentansvar och krav vid upphandling och så vidare.

Utöver dessa risker så ser vi också en risk att incitamenten för källsortering kan minska. Detta är inte en risk som uppstår just för att kemisk återvinning finns tillgänglig, utan snarare på grund av den ökade utsortering av restavfallet som är på gång vid exempelvis Brista. Det finns en risk att folk får en uppfattning att det inte spelar någon roll att källsortera sitt avfall om det ändå kommer att sorteras i efterhand. I vår intervju¹⁷⁸ med Stockholm Exergi och SÖRAB så sa de att de har sett att det sedan producentansvarets införande på 1990-talet har varit i stort sett lika stor andel tidningar och förpackningar i restavfallet oavsett de informationsinsatser som gjorts genom åren. De ser denna eftersortering som enda utväg för att minska mängden återvinningsbart material som går till förbränning. Det stämmer väl med de plastflöden som vi tittade på i den här studien, se Figur 7, där det är en betydande mängd plast som följer med restavfallet till förbränning. I Sverige som helhet så är mängden plast i restavfallet (ca 250 000 ton/år) större än den sammanlagda mängden plast i sorterade plastförpackningar och PET-flaskor (ca 130 000 ton/år). De erfarenheter som kommer från att driva denna eftersortering vid Brista och liknande anläggningar kommer vara värdefull för att se hur folk kommer reagera. Det kommer också vara värdefullt att se hur plasten från Brista kommer kunna hanteras av Svensk Plaståtervinning i Motala, till exempel hur stor andel som kommer sorteras ut för mekanisk återvinning. I en annan intervju, som utfördes i ett examensarbete som handlade om eftersortering av plastförpackningar från hushållsavfall¹⁷⁹, så svarade Mattias Philipsson (VD för Svensk Plaståtervinning) att den plast som kommer från en sådan sortering kommer i alla fall inte vara värre än den plast som de redan får in från källsorterade plastförpackningar. Det ska bli intressant att se om den förutsägelsen stämmer.

9.3.4 Trender i industrin

Från de intervjuer som genomförts och från de initiativ som är igång i världen så märks en trend i att den klassiska fossilindustrin söker nya råvaror. Allt som går att framställa från fossil olja går tekniskt även att framställa från andra kolkällor, vilket kan vara plast, biomassa, bioolja, biogas, syntesgas och till och med koldioxid. I vissa fall kommer det vara helt omöjligt att säga vart molekylerna (eller kolatomerna) från en kemiskt återvunnen plast tar vägen. Som exempel kan plasten omvandlas till en pyrolysolja som i sin tur går vidare till ett raffinaderi där det, ihop med annan olja, separeras i längre och kortare kolkedjor, som i sin tur omvandlas vidare till en mängd olika produkter som exempelvis kan vara bränslen, plast eller läkemedel. I ett sådant fall är det rimligt att hålla ordning på molekylerna med någon form av certifikat baserat på massbalansprincipen, där massbalansen antingen kan fördelas enligt någon form av medelvärde där alla produkter får en del av de återvunna molekylerna eller så kan det fördelas via certifikat där endast vissa produkter tar alla återvunna molekyler. Certifikaten garanterar att utgivaren inte säljer mer produkter med certifikat än den andel och mängd biobaserat eller återvunnet som tas in i deras processer. Idén är likartad den med el-certifikat. Just system med massbalans fördelat via certifikat verkar vara det som föredras av de industrier där det inte enkelt går att spåra molekylerna. Ett sådant system innebär alltså att exempelvis en chipsproducent kan säga att deras chipspåsar är tillverkade av helt återvunnen plast, eller att ett läkemedelsföretag kan säga att den aktiva substansen i deras huvudvärkstabletter är tillverkad av återvunnen råvara från plast, eller att ett bränsleföretag kan sälja återvunnen diesel. Ett sådant system har både för- och nackdelar. Det är troligtvis det enda sättet som man på något rimligt sätt kan hålla koll på att det inte säljs

¹⁷⁸ Höglund, S. & Carlberg, A. Personlig kommunikation. November 2020

¹⁷⁹ Larsson 2020

mer återvunnet än vad som tas in i ett så blandat system, men det är samtidigt svårt att säga om återvinningen sker till bränsle eller till ny plast eller andra produkter. Vi kan däremot förvänta oss att branschen kommer försöka utnyttja sina råvaror så effektivt som möjligt. Som motpol till detta har vi andra system som tar in plast som råvara och endast producerar plast som produkt, där antingen plasten löses upp och fälls ut eller där den bryts ner till monomerer. Slutprodukten i båda fallen är en plast bestående av samma polymer som råvaran. Där är det enkelt att säga att plasten inte återvanns som bränsle.

Vi bedömer att ett system baserat på massbalans, eller liknande, är nödvändigt för att vissa delar av kemisk återvinning ska komma igång och fungera. För att skapa den efterfrågan som krävs i ett sådant här system så måste man på något sätt kunna sälja en produkt som kan sägas vara återvunnen. Det krävs någon form av opartisk granskare som bekräftar att produkten är återvunnen. Det räcker inte att det är producenten själv som säger att det är återvunnet då det saknar nödvändig trovärdighet i det här fallet. Ett accepterat system för spårbarhet kommer också vara viktigt för att sätta upp många regler, lagar och mål som berör kemisk återvinning. Lämpligt är i så fall om flera nationer kan komma överens om en gemensam fungerande standard. Den här studien har inte gått in på djupet av hur en massbalans kan eller bör beräknas, men det finns förtydligat i andra studier¹⁸⁰.

9.4 Potential för miljö- och klimatnytta

9.4.1 Resurser och energi

Vid en process där plast återvinns som plast via kemisk återvinning så sker det i de allra flesta fall en form av upcycling, det vill säga att produkten faktiskt är bättre än råvaran. Det går att göra om ett smutsigt och blandat plastflöde till en ny råvara som kan användas i direkt kontakt med mat. Det sker delvis på bekostnad av att man får tillbaka en mindre mängd plast än man ursprungligen behandlade. Men samtidigt så behöver det tillsättas energi i processen, vilket ofta kommer (delvis) från råvaran själv. Det uppstår också allt som oftast restfraktioner som är svåra att omvandla till en värdefull produkt. Resurseffektiviteten är alltså inte lika bra som att kunna mekaniskt återvinna en ren plastfraktion till en likvärdig produkt, vilket återspeglas i klimatnyttan. Den klimatpåverkan som beräknades i kapitel 7 tittade dock bara på återvinningen av en ren LDPE, utan tillsatser. För en smutsig, blandad plastfraktion som eventuellt har en del besvärliga tillsatser så kommer klimatnyttan bli helt annorlunda. Då uppstår det betydande restfraktioner även vid den mekaniska återvinningen och produkten får betydligt lägre kvalitet.

Processens utformning och hur den körs, och även vilka avfallsplastsorter man stoppar in, ger olika stor andel användbara molekyler som man kan göra ny plast av, eller använda som bränsle eller göra andra kemikalier av. De användbara molekylerna kommer dessutom se olika ut i olika fall. Vi har försökt ställa upp processerna i ungefär den ordning de borde hamna i en så kallad avfallstrappa, där upplösning och utfällning utnyttjar och bevarar materialet i högst grad medan CCU bryter ner materialet mest och kräver mest energi och resurser för att få ut samma mängd användbar slutprodukt.

¹⁸⁰ Nyström et al. 2020

Teoretiskt skulle våra återvunna kolatomer från fossilplast kunna cirkulera om och om igen. Detta på grund av att kemisk återvinning skulle kunna nyttiggöra alla förorenade eller obrukbara polymerer baserade på fossil eller grön råvara till användbara ”återvunna kolatomer”. Därför kommer efterfrågan på fossil råvara att minska om vi kan återvinna våra redan använda fossila kolatomer i dagens plastprodukter.

Det kan vara värt att här kommentera nyttan eller risken med en massbalansberäkning. Om man stoppar in 100 kg plast i en återvinningsprocess så kommer det inte ut 100 kg plast som produkt. Vissa av processerna kommer väldigt nära 100 kg, i alla fall om det ingående materialet är väldigt rent. Andra processer använder en del av plasten för att generera den energi som krävs för att driva processen. Man skulle i princip kunna köra en likvärdig process och ta en del av energin från annat håll och på så sätt få ut en större mängd produkt. Men processen var ju egentligen inte mer effektiv för det. Som exempel skulle man kunna ta Enerkems förgasning. Den processen har ett underskott av väteatomer om den körs på bara avfall eller bara plast eller bara biomassa. För att få tillräckligt med väteatomer så kan det tillsättas antingen vatten (H₂O) eller vätgas (H₂). Om man använder vatten så kommer en större del av materialet gå till spillo som koldioxid. Om man istället använder vätgas så tillför vätgasen extra energi och en mindre mängd material går till spillo. I princip skulle man kunna gå så långt så att allt material utnyttjades om det bara tillsattes tillräckligt mycket vätgas, vilket alltså innebär att man utnyttjar lite av den tekniken som beskrevs under kapitlet om CCU. Hur mycket återvunnet ska man räkna med att man har i de här olika fallen? Det skulle i princip även kunna vara så att man använder vätgas utvunnen ur fossil naturgas som användes i en sådan process. Ska man då räkna metanolen som 100 % återvunnen? I ett sådant fall skulle det kunna vara lämpligare att utgå från en energibalans istället för massbalans eller att det utgår från LCA-beräkningar.

9.4.2 Är farliga ämnen inte längre ett problem vid kemisk återvinning?

Eftersom det handlar om kemiska processer kan man egentligen aldrig till 100 % garantera frihet från potentiellt riskabla ämnen. De olika teknikerna har något olika karakteristik avseende detta.

Vi har konstaterat att det varit ganska svårt att få helt klarlagd och likvärdig information för de olika teknikerna och för de olika varianterna av olika teknik, hur de hanterar tillsatser och eventuellt bildade farliga ämnen. Upplösningstekniken bygger på att man använder ett eller flera lösningsmedel, samtidigt som eventuella farliga tillsatser i plasten som ska återvinnas ska separeras ut, men en viss risk kan finnas att tillsatser följer med polymeren i upplösningen. Farliga ämnen kan återcirkuleras vid en del typer av kemisk återvinning, vilket till exempel var problemet med just Vinyloop där otillåtna mjukgörare löstes upp ihop med polymeren (PVC).

Depolymerisationstekniken sker också i ett reaktionsmedium, och det finns därmed i princip samma riskfaktorer som för upplösningen. Farliga ämnen kan också skapas vid en kemisk återvinning, till exempel i form av att halogener från ett orent material fastnar på aromatiska strukturer vilket alltså kan bidra med exempelvis dioxiner eller dioxinliknande föreningar. Denna riskfaktor är möjligen mera aktuell för pyrolys- och förgasningsteknikerna, då det i dessa i allmänhet bildas en tjära- eller koksfraktion som innehåller aromatiska strukturer.

Vi har också sett att det finns tekniska lösningar för att hantera dessa farliga ämnen, där farliga ämnen bryts ner, oskadliggörs eller fångas upp i processerna. De företag som tillhandahåller

tekniken för kemisk återvinning säger oftast att ”det är inga problem” eftersom de alltid ser till att följa de krav som ställs på dem. Där kan det vara värt att poängtera att kraven som ställs från köparen/nyttiggöraren ofta skiljer sig från de krav som ställs från myndigheter men kraven från köparen/nyttiggöraren kan också ofta vara högre ställda än från myndigheterna.

Kemisk återvinning kan också ge en ny möjlighet att hantera kontaminerade plastavfallsströmmar som idag ej kan hanteras i dagens återvinnings- och förbränningsanläggningar, vilket skulle minska miljöpåverkan av dessa farliga ämnen. De olika processerna för kemisk återvinning har olika potential att hantera olika typer av föroreningar och återvinningen bör anpassas därefter. För att bryta ned organiska föroreningar så är högtemperaturprocesser, så som solvolys, pyrolys och förgasning lämpliga. Ju högre temperatur som används desto mer bryts de organiska molekylerna ner, så för riktigt stabila organiska molekyler så krävs en högre temperatur. Solvolysen är användbar för att effektivt rena bort halogener som brom och klor, men också andra vattenlösliga föroreningar. Upplösning/utfällning och depolymerisering kan användas för att ta bort föroreningar då processen är anpassad för vissa specifika föroreningsprofiler och har därmed bra potential att anpassas för specifika försorterade plastavfallsströmmar. Dessa processer har dessutom möjligheten att kunna kombineras med varandra och med den klassiska mekaniska återvinningen för att få en effektiv och giftfri återvinning av plast. Vi ser här att det är framförallt de mindre och mer kontaminerade strömmarna som kommer ha störst behov av framtida forskningsresurser då det kommer vara svårt att bygga ekonomiskt möjliga processer av dessa avfallsströmmar.

9.4.3 Potential för klimatnytta

Det vi har sett är att klimatnyttan med kemisk återvinning är generellt sett lägre än klimatnyttan för mekanisk återvinning, för de plastflöden som är möjliga att återvinna mekaniskt och förutsatt att den mekaniskt återvunna plasten faktiskt ersätter annan plast. Samtidigt så är klimatnyttan generellt sett större med kemisk återvinning än att förbränna plasten med energiåtervinning. Det går att tänka fram scenarier där denna generella klimatnytta inte stämmer, där klimatnyttan istället är betydligt högre eller lägre. Om processen exempelvis använder energi och råvaror från förnyelsebara, eller på annat sätt koldioxidsnåla, källor så kommer den ha en högre klimatnytta än om processen använder fossila energi- och råvarukällor.

Vi har försökt ställa upp processerna i ungefär den ordning de sinsemellan borde hamna i en så kallad avfallstrappa, för att grovt indikera hur resurs-, energi-, och klimateffektiva processerna kan anses vara:

Upplösning/utfällning

Depolymerisering

Solvolys

Pyrolys

Förgasning

CCU

Man bör alltså i normalfallet eftersträva att återvinna ett plastmaterial via en process som ligger så långt upp i denna avfallstrappa som möjligt. Då får man generellt sett den högsta resurs- energi- och klimatnyttan. Det förtjänar dock att påpekas att alla plastflöden inte passar i alla olika processer, och att lokala förutsättningar som gäller sådant som plastavfallets tillgänglighet i lämpliga volymer, logistiksituationen, befintlig infrastruktur med möjlighet till process- eller annan integration och liknande kan spela roll i det enskilda fallet.

Referenser

Andersson, A., Rydström, A.-M., Gustafsson, M., & Lindskog, N. (2021). *Pyrolys och förgasning - tillgängliga tekniker och deras miljöpåverkan*. IVL, Svenska Miljöinstitutet, rapport nr. U 6395.

Barrett, A. (2019, 20 augusti). *The Chemical Recycling Industry Unleashes the Armada*. Bioplastics News.
<https://bioplasticsnews.com/2019/08/20/chemcycling-industry-armada/>

BASF. (2020). *ChemCycling™: Environmental Evaluation by Life Cycle Assessment (LCA)*. Hämtad från:
<https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/mass-balance-approach/chemcycling/lca-for-chemcycling.html>

Berdugo Vilches, T., Marinkovic, J., Seemann, M., & Thunman, H. (2016). Comparing Active Bed Materials in a Dual Fluidized Bed Biomass Gasifier: Olivine, Bauxite, Quartz-Sand, and Ilmenite. *Energy and Fuels*, 30(6), 4848–4857.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00327>

Bergsma, G., Broeren, M. (2019). *Exploratory study on chemical recycling*. Hämtad från:
<https://www.cedelft.eu/en/publications/2173/exploratory-study-on-chemical-recycling-update-2019>

Bergsma, G., Jaspers, D. (2017). *Innovatie afvalverwerkingstechnieken doorgelicht. (Investigated innovation in waste processing techniques)*. Hämtad från:
<https://www.ce.nl/publicaties/2052/innovatie-afvalverwerkingstechnieken-doorgelicht>

Carbon Recycling International. (2021). *Resource efficiency by carbon recycling*. Hämtad 2021-02-09 från:
<https://www.carbonrecycling.is/>

CEFIC. (2020). *Chemical Recycling: Making Plastics Circular*. Hämtad 2020-02-09 från:
<https://cefic.org/a-solution-provider-for-sustainability/chemical-recycling-making-plastics-circular/>

CreaCycle. (2021a). *MultiCycle (2018)*. Hämtad 2021-02-09 från:
<https://www.creacycle.de/en/creasolv-plants/multicycle-2018-en.html>

CreaCycle. (2021b). *PolyStyreneLoop (2016)*. Hämtad 2021-02-09 från:
<https://www.creacycle.de/en/creasolv-plants/polystyrene-loop-2016.html>

CreaCycle. (2021c). *Unilever – Sachet Recycling (2015)*. Hämtad 2021-02-09 från:
<https://www.creacycle.de/en/projects/packaging/unilever-sachet-recycling-2015.html>

dos Passos, J. S., Glasius, M., & Biller, P. (2020). Screening of common synthetic polymers for depolymerization by subcritical hydrothermal liquefaction. *Process Safety and Environmental*

Protection.

<https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.040>

Enerkem. (2020, 8 december). *News release - CAD\$875 million biofuel plant in Varennes.* Hämtad 2021-02-09 från:

<https://enerkem.com/news-release/cad875-million-biofuel-plant-in-varennes/>

European Commission (2020a). *Guidance for the compilation and reporting of data on packaging and packaging waste according to Decision 2005/270/EC.* Version of 20 May 2020.

<https://ec.europa.eu/eurostat/documents/342366/351811/Guidance+for+the+compilation+and+reporting+of+data+on+packaging+and+packaging+waste+%E2%80%93+20+May+2020+version>

European Commission (2020b). *A new Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe.* COM(2020) 98 final.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:98:FIN>

Fresme. (2017). *From residual steel gases to methanol.* Hämtad 2021-02-09 från:

<http://fresme.eu/>

Fråne, A., Andersson, T., & Lassesson, H. (2017). *Materialåtervinning av plastavfall från återvinningscentraler.* IVL, Svenska Miljöinstitutet, rapport nr. C 249. Hämtad från:

<https://www.ivl.se/download/18.34244ba71728fcb3f3fa32/1591705755960/C245.pdf>

Gao, F. (2010). *Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels.* [Doktorsavhandling, University of Canterbury].

Gogate, M. R. (2019). Methanol-to-olefins process technology: current status and future prospects. *Petroleum Science and Technology.* 37(5).

<https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1555589>

Göteborg Energi. (2018, 3 april). *GoBiGas-projektet avslutas men anläggningen kan få en roll i framtidens energiförsörjning.* Hämtad från:

https://www.mynewsdesk.com/se/goteborg_energi/pressreleases/gobigas-projektet-avslutas-men-anlaeggningen-kan-faa-en-roll-i-framtidens-energifoersoerjning-2466344

Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., & Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of hazardous materials*, 344, 179-199.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>

Hann, S., Connock, T. (2020). *Chemical Recycling: State of Play.* Hämtad från:

<https://www.eunomia.co.uk/reports-tools/final-report-chemical-recycling-state-of-play/>

INEOS. (2020, 21 april). *INEOS and Plastic Energy to collaborate on new advanced plastic recycling facility.* Hämtad 2021-02-09 från:

<https://www.ineos.com/news/shared-news/ineos-and-plastic-energy-to-collaborate-on-new-advanced-plastic-recycling-facility/>

Ioniqa. (2019, 9 juli). *Ioniqa takes first 10 kiloton PET upcycling factory into operation*. Hämtad 2021-02-09 från:

<https://ioniqa.com/ioniqa-takes-first-10-kiloton-pet-upcycling-factory-into-operation/>

JEPLAN. (u.å.). *BRING Technology™ – Making bottles from bottles*. Hämtad 2021-02-09 från:
<https://www.jeplan.co.jp/en/technology/bottle/>

Kumar, A., Jones, D. D., & Hanna, M. A. (2009). Thermochemical biomass gasification: A review of the current status of the technology. *Energies*, 2(3), 556–581.
<https://doi.org/10.3390/en20300556>

Larsson, J. (2020) *Automated Central Sorting of Plastic Packaging Waste – A Qualitative Study of Drivers, Barriers and Possible Solutions for Implementing Automated Central Sorting of Plastic Packaging Waste in Sweden*. [Examensarbete, Uppsala Universitet]. Hämtad från:
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-416589>

Licella. (2018, 17 augusti). *Neste to collaborate with Licella in utilization of waste plastic*. Hämtad 2021-02-09 från:

<https://www.licella.com.au/news/neste-to-collaborate-with-licella-in-utilization-of-waste-plastic/>

Licella. (2021). *Facilities*. Hämtad 2021-02-09 från:

<https://www.licella.com.au/facilities/>

Liquid Wind. (2020). *CO₂ secured for first eFuel facility*. Hämtad 2021-02-09 från:

<https://www.liquidwind.se/news/ovikenergi>

Ljungkvist Nordin H., Lindkvist, L., Boss, A., Naumann, H., & Boberg, N. (2019a). *Kartläggning av plastavfallsflöden, återvinningsmetoder och marknader: kunskapsunderlag för ett returaffineri*.

<https://www.ivl.se/download/18.5bc68544171830dff503b3/1587373396259/C516.pdf>

Ljungkvist Nordin, H., Lindkvist, L., & Ekici, S. (2020). *Cirkulär fordonsplast*.

<https://www.ivl.se/download/18.34244ba71728fcb3f3fb19/1591706116140/C481.pdf>

Ljungkvist Nordin, H., Westöö, A., Boberg, N., Fråne, A., Guban, P., Sörme, L., & Ahlm, M. (2019b). *Kartläggning av plastflöden i Sverige* (SMED Rapport Nr 01).

<https://www.naturvardsverket.se/upload/miljoarbete-i-samhallet/miljoarbete-i-sverige/plast/smed-rapport-kartlaggning-plastfloden-191122.pdf>

Lyckeskog, H. N., Mattsson, C., Olausson, L., Andersson, S. I., Vamling, L., & Theliander, H. (2017). Thermal stability of low and high Mw fractions of bio-oil derived from lignin conversion in subcritical water. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 7(4), 401–414.

<https://doi.org/10.1007/s13399-016-0228-4>

Lätt, A., Johannesson C., Nellström, M., Hallberg, L., Guban, P., Ortiz, C., Gunnarsson, J., & Mawdsley, I. (2020). *Hållbar plastanvändning – olika åtgärders potentialer för att minska växthusgasutsläppen från förbränning av fossilbaserad plast* (SMED Rapport Nr 05).
<http://naturvardsverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1459067/FULLTEXT01.pdf>

Ma, C., Yu, J., Wang, B., Song, Z., Xiang, J., Hu, S., ... Sun, L. (2016). Chemical recycling of brominated flame retarded plastics from e-waste for clean fuels production: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 433-450.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.020>

Mattsson, C., André, A., Juntikka, M., Tränkle, T., & Sott, R. (2020). Chemical recycling of End-of-Life wind turbine blades by solvolysis/HTL. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 942(1), 012013
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/942/1/012013>

Mattsson, C., Junttika, M., Sott, R., & Tränkle, T. (2020b). *Kemisk återvinning av glasfiberkomposit från vindturbinblad*. (Rapport Nr. 2018-007282) Energimyndigheten.
<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1525435/FULLTEXT01.pdf>

MultiCycle. (2020, 9 februari). *Overview*. Hämtad från:
<http://multicycle-project.eu/>

Neste. (u.å.). *Waste Plastics*. Hämtad 2021-02-09 från:
<https://www.neste.com/products/all-products/raw-materials/future-raw-materials/waste-plastics>

Nyström, I., Andersson, E., & Arnsvik Bjurefalk, T. (2020). *Standards and certification schemes related to the mass balance approach. Applications in chemical industry*.
https://www.johannebergsciencepark.com/sites/default/files/Report_mass%20balance_approved_200406_3.pdf

OMV. (2020, 5 juni). *ReOil: 200,000 kg of plastic waste recycled with OMV's circular economy pilot project*. Hämtad 2020-02-09 från:
<https://www.omv.com/en/news/reoil-200-000-kg-of-plastic-waste-recycled-with-omv-s-circular-economy-pilot-project->

Pantamera. (u.å.). *Burk & PET*. Hämtad 2021-02-09 från:
<https://pantamera.nu/pantsystem/fakta/burk-pet/>

Pedersen, T. H., & Conti, F. (2017). Improving the circular economy via hydrothermal processing of high-density waste plastics. *Waste Management*, 68, 24-31.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.002>

Perstorp. (2020). *Perstorp plan to reduce carbon emission with half million tons by producing sustainable methanol*. Hämtad 2021-02-09 från:

https://www.perstorp.com/en/news_center/pressreleases/2020/perstorp_producing_sustainable_methanol

Plastic Energy. (2019, 28 juni). *PRESS RELEASE: PETRONAS Chemicals signs MOU with Plastic Energy™*. Hämtad 2021-02-09 från:

<https://plasticenergy.com/press-release-petronas-chemicals-signs-mou-with-plastic-energy/>

Plastic Energy. (2020, 13 oktober). *Total and Plastic Energy announce a strategic partnership and the construction of the first chemical recycling plant in France*. Hämtad 2021-02-09 från:

<https://plasticenergy.com/total-and-plastic-energy-announce-a-strategic-partnership-and-the-construction-of-the-first-chemical-recycling-plant-in-france/>

PolyStyreneLoop. (u.å.). *PolyStyreneLoop*. Hämtad 2021-02-09 från:

<https://polystyreneloop.eu/>

PureCycle Technologies. (2021). *Recycled resin – Virgin Technologies*. Hämtad 2021-02-09 från:

<https://purecycletech.com/>

Quantafuel. (2020). *Financial and regulatory news*. Hämtad 2021-02-10 från:

<https://quantafuel.com/investorsinvestment-case/>

ReNew ELP. (2021). *Seeking to Change the Way the World Views Plastic Waste*. Hämtad 2021-02-09 från:

<https://renewelp.co.uk/>

RISE. (2020). *Kemiskt återvunnen PET/polyester som råvara för additiv och ny polymer*. Hämtad 2021-02-09 från:

<https://www.ri.se/sv/vad-vi-gor/projekt/kemiskt-atervunnen-petpolyester-som-ravara-additiv-och-ny-polymer>

SABIC. (2019, 9 februari). *SABIC first in industry to launch polycarbonate based on certified renewable feedstock*.

<https://www.sabic.com/en/news/21603-sabic-first-in-industry-to-launch-polycarbonate-based-on-certified-renewable-feedstock>

Sahlin, J., Solis, M., Bisailon, M., Edo, M., Jensen, C., & Johansson, I. (2019). *Bränslekvalitet – Nuläge och scenarier för sammansättningen av restavfall till år 2025*. Rapport 2019:27 ISSN 1103:4092.

Schlummer, M., Mäurer, A., Wagner, S., Berrang, A., Fell, T., & Knappich, F. (2017). Recycling of flame retarded waste polystyrene foams (EPS and XPS) to PS granules free of hexabromocyclododecane (HBCDD). *Adv. Recycl. Waste Manag*, 2, 1-6.

<https://doi.org/10.4172/2475-7675.1000131>

Seshasayee, M. S., & Savage, P. E. (2020). Oil from plastic via hydrothermal liquefaction: Production and characterization. *Applied Energy*, 278, 115673.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115673>

Sherwood, J. (2020). Closed-loop recycling of polymers using solvents. *Johnson Matthey Technology Review*, 64(1), 4-15.
<https://doi.org/10.1595/205651319x15574756736831>

Sundin, C. (2019). *Environmental Assessment of Electrolyzers for Hydrogen Gas Production*. [Examensarbete, Kungliga Tekniska Högskolan].
<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1354467/FULLTEXT01.pdf>

Svensk Plaståtervinning. (2020, 21 september). *Nytt samarbete räddar 200 000 ton felsorterade plastförpackningar*.
<https://www.svenskplastatervinning.se/nytt-samarbete-raddar-200-000-ton-felsorterade-plastforpackningar/>

SVT. (2020). *Motalaföretag får 105 miljoner från Klimatklivet*. SVT Nyheter.
<https://www.svt.se/nyheter/lokalt/ost/motalaforetag-far-105-miljoner-fran-klimatklivet>

Thiounn, T., & Smith, R. C. (2020). Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste. *Journal of Polymer Science*, 58(10), 1347-1364.
<https://doi.org/10.1002/pol.20190261>

Thunman, H., Seemann, M., Berdugo Vilches, T., Maric, M., Pallares, D., Ström, H., Berndes, G., Knutsson, P., Larsson, A., Breitholtz, C., & Santos, O. (2017). Advanced biofuel production via gasification – lessons learned from 200 man-years of research activity with Chalmers' research gasifier and the GoBiGas demonstration plant. *Energy Science & Engineering*.
<https://doi.org/10.1002/ese3.188>

Toraman, H. E.; Dijkmans, T.; Djokic, M. R.; Van Geem, K. M.; Marin, G. B. Detailed compositional characterization of plastic waste pyrolysis oil by comprehensive two-dimensional gas-chromatography coupled to multiple detectors. *J. Chromatogr. A* 2014, 1359, 237–246.

Tudball, M. (2020, 9 september). *INEOS Styrolution, Trinseo and Agilyx plan new PS chemical recycling plant*. ICIS.
<https://www.icis.com/explore/resources/news/2020/09/09/10550796/ineos-styrolution-trinseo-and-agilyx-plan-new-ps-chemical-recycling-plant>

Vollmer, I., Jenks, M. J., Roelands, M. C., White, R. J., van Harmelen, T., de Wild, P., ... Weckhuysen, B. M. (2020). Beyond Mechanical Recycling: Giving New Life to Plastic Waste. *Angewandte Chemie International Edition*.
<https://doi.org/10.1002/anie.201915651>

Wagner, S. & Schlummer, M. (2020). Legacy additives in a circular economy of plastics: Current dilemma, policy analysis, and emerging countermeasures. *Resources, Conservation and*

Recycling, 158, 104800.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104800>

Waldheim, L. (2019). *Kemisk återvinning av plastavfall, kartläggning av pågående aktiviteter*, Johanneberg Science Park.

Wang, Y. & Zhang, F. S. (2012). Degradation of brominated flame retardant in computer housing plastic by supercritical fluids. *Journal of hazardous materials*, 205, 156-163.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.12.055>

Zhan, L., Jiang, L., Zhang, Y., Gao, B., & Xu, Z. (2020). Reduction, detoxification and recycling of solid waste by hydrothermal technology: A review. *Chemical Engineering Journal*, 124651.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124651>

Zhao, Y. B., Lv, X. D., & Ni, H. G. (2018). Solvent-based separation and recycling of waste plastics: A review. *Chemosphere*, 209, 707–720. [http](http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.095)

[s://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.095](http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.095)

Zimmermann, H., & Walzl, R. (2009). Ethylene. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*.

https://doi.org/10.1002/14356007.a10_045.pub3

Bilaga 1

En översikt över plastavfallsflöden i Sverige baserat på statistik från 2016–2017 visas i Tabell 4 nedan. Då utfallet för utsorterat plastavfall från industrier är okänt och indikationer finns på att endast mindre delar återvinns kan stora delar av flödet antas gå till förbränning, dock markeras det här som okänt.

Tabell 4 - Plastavfallsflöden i Sverige, total och fördelat på sluthantering av avfallet sammanställt ur SMED Rapport 2019:01¹⁸¹ och uppgifter från Fiskeby Board¹⁸².

Flöde	TOTAL (ton)	Förbränning (ton)	Materialåtervinning (ton)	Deponi (ton)
Restavfall	249 000	249 000	0	0
Utsorterade förpackningar	96 000	48 000	48 000	0
PET-flaskor	32 000	5120	26 880	0
Fordon	41 000	37 000	0	4 000
Elektronikavfall	31 000	15 500	13 950	1 550
Bygg- och rivningsavfall	152 000	151 000	1000	0
Blandat avfall från verksamheter (till förbränning), inkl. import	791 000	791 000	0	0
Utsorterad plast från industrier	143 000	?	?	?
Grovavfall	77 000	75 000	2 000	0
Lantbruksplast	18 000	2 000	16 000	0
Plast i vätskekartong	10 000	10 000	0	0

Uppskattningar av polymersammansättningar för plastavfallsflöden visas i Tabell 5. Årtalen för underlagen för de olika flödena varierar men referensstudierna baseras på statistik och plockanalyser från år 2014–2018.

¹⁸¹ Ljungkvist Nordin et al. 2019b

¹⁸² Sundblad, A. Personlig kommunikation. November 2020

Tabell 5 – Polymersammansättningar i ton för svenska plastavfallsflöden år 2016 - 2017, snedstreck motsvarar ”och/eller” och plustecken används för blandningar^{183,184,185,186,187}.

Flöde	PP	PE	PET	PA6/ PA66	PC/ ABS	ABS	PC	PS	PVC	PS/ ABS	PS/ HIPS	PPE+SB	Okänd/ övrig plast	TOTALT
Blandat avfall från verksamheter (till förbränning)													791 000	791 000
Restavfall	69 297	113 619	22 310				324	11 778	971				30 702	249 000
Utsorterad plast från industrier													143 000	143 000
Bygg- och rivningsavfall		21 280							94 240				36 480	152 000
Utsorterade förpackningar	21 120	49 920	16 320										8 640	96 000
Grovavfall	21 560	5 198	2 156				3 881		5 390	5 606			33 210	77 000
Fordon	15 170	8 200		8 200	4 100	2 870							2 460	41 000
PET-flaskor	1 600	1 600	28 800											32 000
Elektronikavfall	4 650				915	7 130	1 550				6 510	930	9 300	31 000
Lantbruksplast	540	17 100											360	18 000
Plast i vätskekartong		10 000												10 000
Summa	133 937	226 917	69 586	8 200	5 015	10 000	5 754	11 778	100 601	5 606	6 510	930	1 055 152	1 640 000

¹⁸³ Fråne et al. 2017

¹⁸⁴ Ljungkvist Nordin et al. 2019a

¹⁸⁵ Ljungkvist Nordin et al. 2019b

¹⁸⁶ Lätt et al. 2020

¹⁸⁷ Sahlin et al. 2019

Kemisk återvinning av plast

RAPPORT 6990

NATURVÅRDSVERKET
ISBN 978-91-620-6990-2
ISSN 0282-7298

Teknik, flöden och miljöaspekter

Henric Lassesson, Marie Gottfridsson, Maja Nellström,
Tomas Rydberg, Lars Josefsson och Cecilia Mattsson

Rapporten uttrycker nödvändigtvis inte Naturvårdsverkets ställningstagande. Författaren svarar själv för innehållet och anges vid referens till rapporten.

Sveriges långsiktiga klimatmål är att nettoutsläppen av växthusgaser ska vara noll senast år 2045. Plast står för över hälften av de fossila utsläppen från avfallsförbränning. För att nå de fastställda klimatmålen behöver den jungfruliga fossila plasten ersättas med material med lägre klimatpåverkan, och materialåtervinningen av plast behöver öka. Det finns flertalet hinder för omställningen som måste överkommas för att detta ska bli verklighet till 2045. Det handlar bland annat om efterfrågan på återvunnen och biobaserad plastråvara. Men också om tillgången på återvunnen råvara.

För att öka förståelsen för vilka plasttyper som passar för olika metoder av kemisk återvinning, vilka olika metoder som är troligt att de blir kommersiellt gångbara och hur olika metoder eventuellt kommer konkurrera med varandra har denna rapport tagits fram. Rapporten belyser även vilken miljö- och climateffekt som olika metoder för kemisk återvinning kan erhålla, samt relationen till mekanisk återvinning.

