

Kemisk återvinning till högkvalitativa produkter

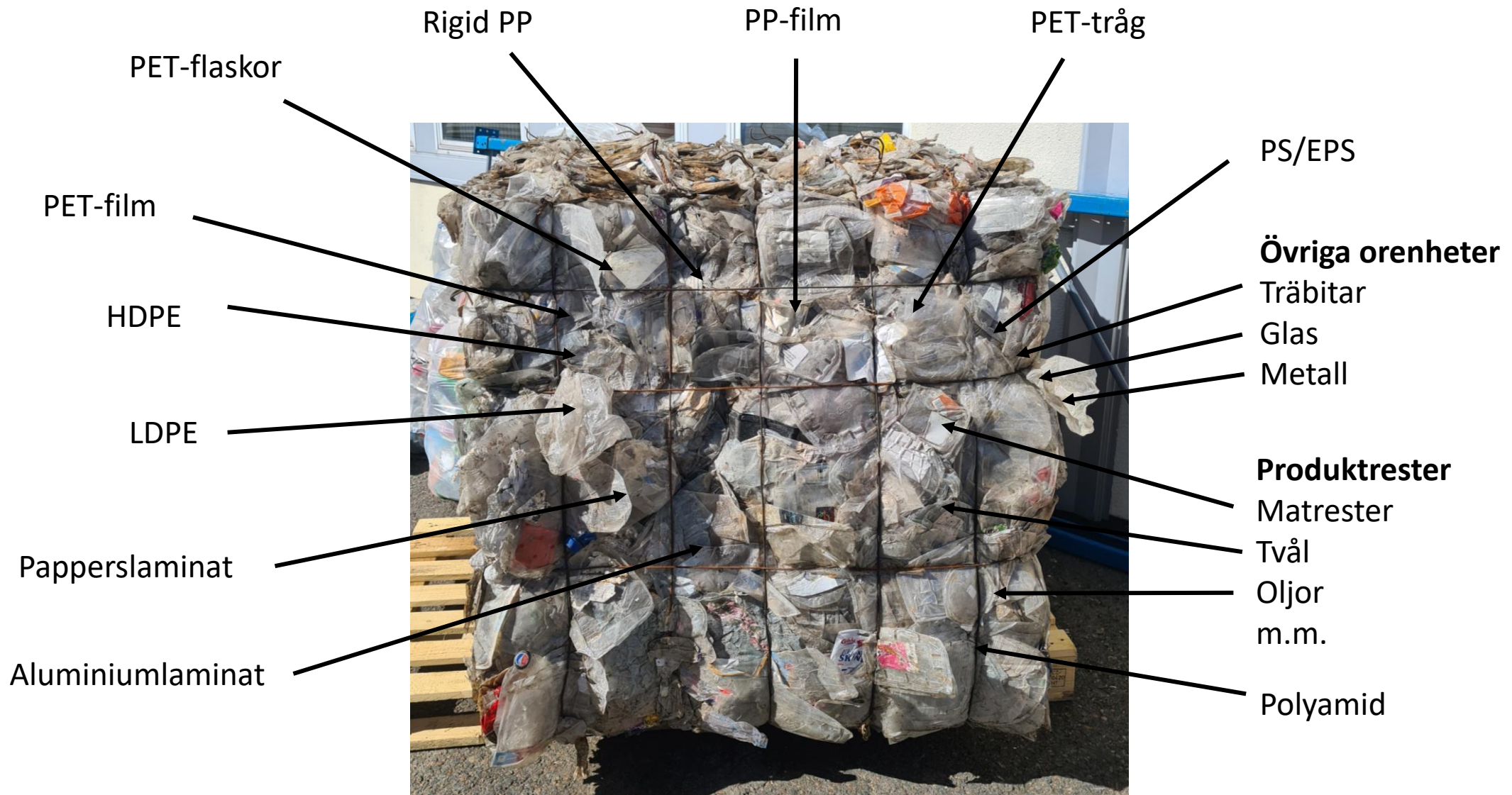
Henrik Thunman, Chalmers
henrik.thunman@chalmers.se
+46 72 7721451

Cecilia Mattsson, RISE
cecilia.mattsson@ri.se
+46 72 246 08 53

Disposition

- **Introduktion** – Cecilia
- **Avfallsflöden**– Henrik
- **Kemisk återvinning- Homogena avfallsflöden**
 - **Depolymerisering** - Cecilia
 - **Pyrolys** – Henrik
- **Kemisk återvinning – heterogena avfallsflöden inkl. rejekt** - Henrik
 - **Högtemperatur pyrolys/Förgasning/CCU**
- **Sammanfattning**





Exampel av sammansättning av olika plaster i ett insamlat material.

Sortering av plastavfall

Grad av
sortering



- Mekanisk återvinning av homogena polymerströmmar
- Kemisk återvinning av homogena polymerströmmar
 - Depolymerisering(PET)
 - Pyrolys (olefiner)
- Kemisk återvinning av blandad plast- och biogentavfall, samt rejekt
 - Thermokemisk återvinning, Pyrolys, HTL, Förgasning



All sortering genererar rejekt: Rejekt som också måste återvinnas

Mekanisk återvinning

- Produkter av en viss polymer
- Polymerer degraderar under sin livstid
- Mekaniska processer kan påverka kvalitén
- Begränsat antal möjliga cykler för återvinning
- Blandade färger:
 - Gråfärgat återvunnet material

Generellt: lägre kvalitet för mekaniskt återvunna polymerer jämfört med jungfruliga



Mekanisk vs Kemisk Återvinning

Kemiska byggstenar för polymerisering av plaster



Mekanisk återvinning



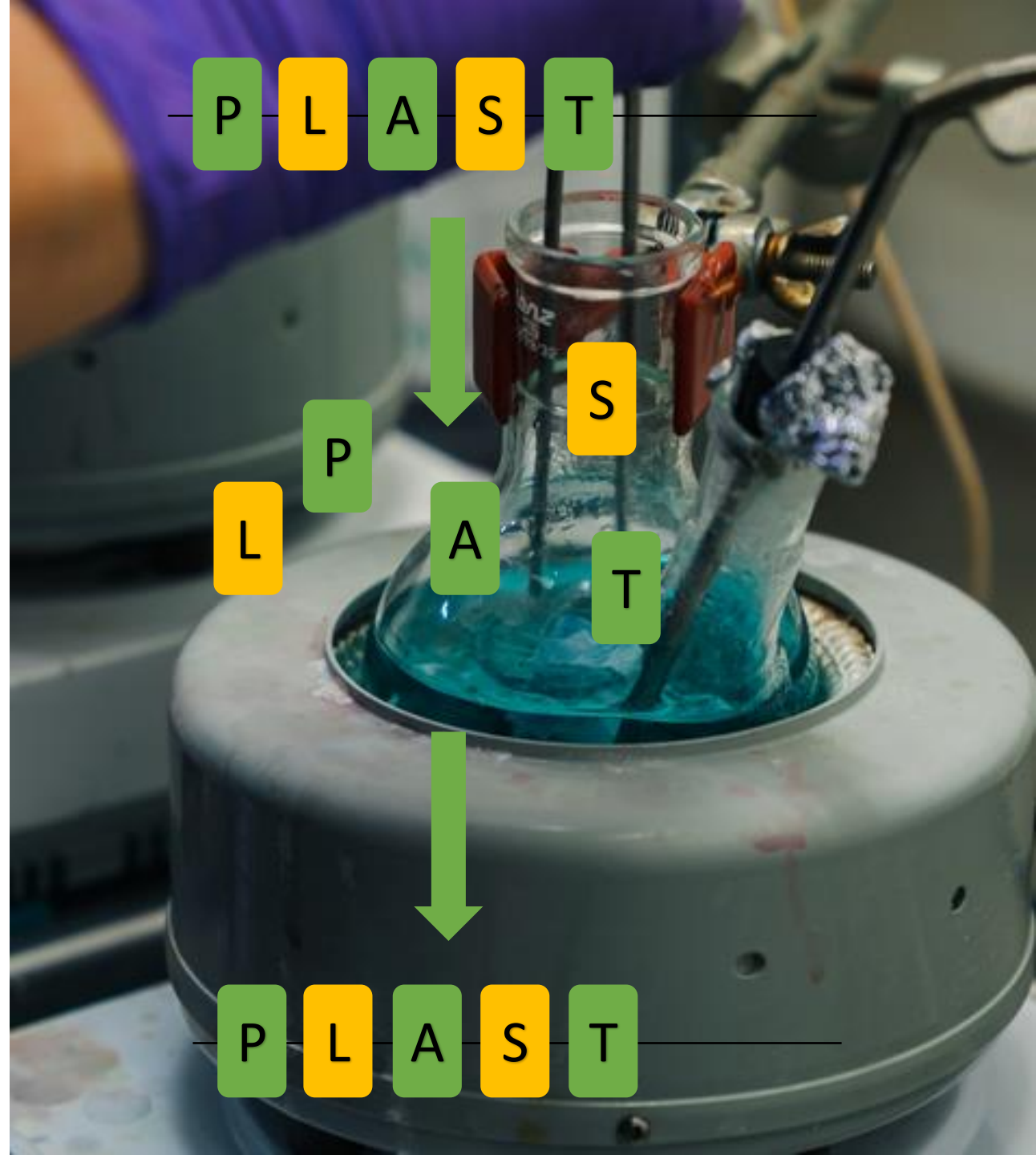
Kemisk återvinning

Kemisk återvinning resulterar i “plastmonomerer” med jungfruliga egenskaper

“Plastmonomerer” som efter polymerisering producerar plaster av jungfrulig eller när jungfrulig kvalitet

Kemisk återvinning

- Polymerer som degraderar under sin livstid.....
- Bryts ner till sina “kemiska byggstenar” ...
- ...för att producera högkvalitativa plast polymerer igen och igen...
- ...och därmed skapa en sluten loop för kolatomerna



Kemisk återvinningsmetoder

Homogena polymerströmmar

Fysikalisk återvinning (lösningsmedel. sep.) (100-250 °C)

Slutprodukt: **polymer**

Depolymerisering (200-250 °C)

Slutprodukt: **monomerer**

Solvolys/HTL

(200-400 °C, 5-25 MPa)

Slutprodukt: **oljeprodukt**

Pyrolysis (400-600 °C)

Slutprodukt: **oljeprodukt**

Heterogena polymerströmmar inkl. rejekt

Högtemperatur pyrolysis
/Förgasning/CCU

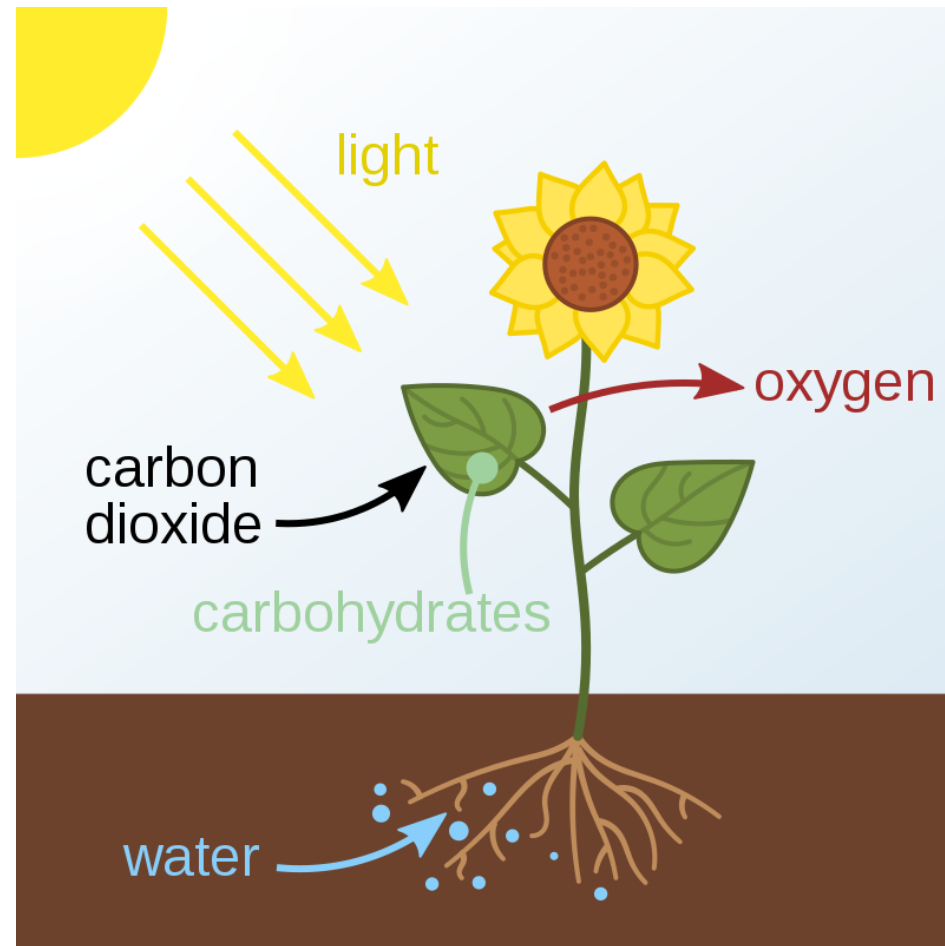
(700-1300 °C)

Slutprodukt: **Primärråvara**
kemiindustri

Temperatur



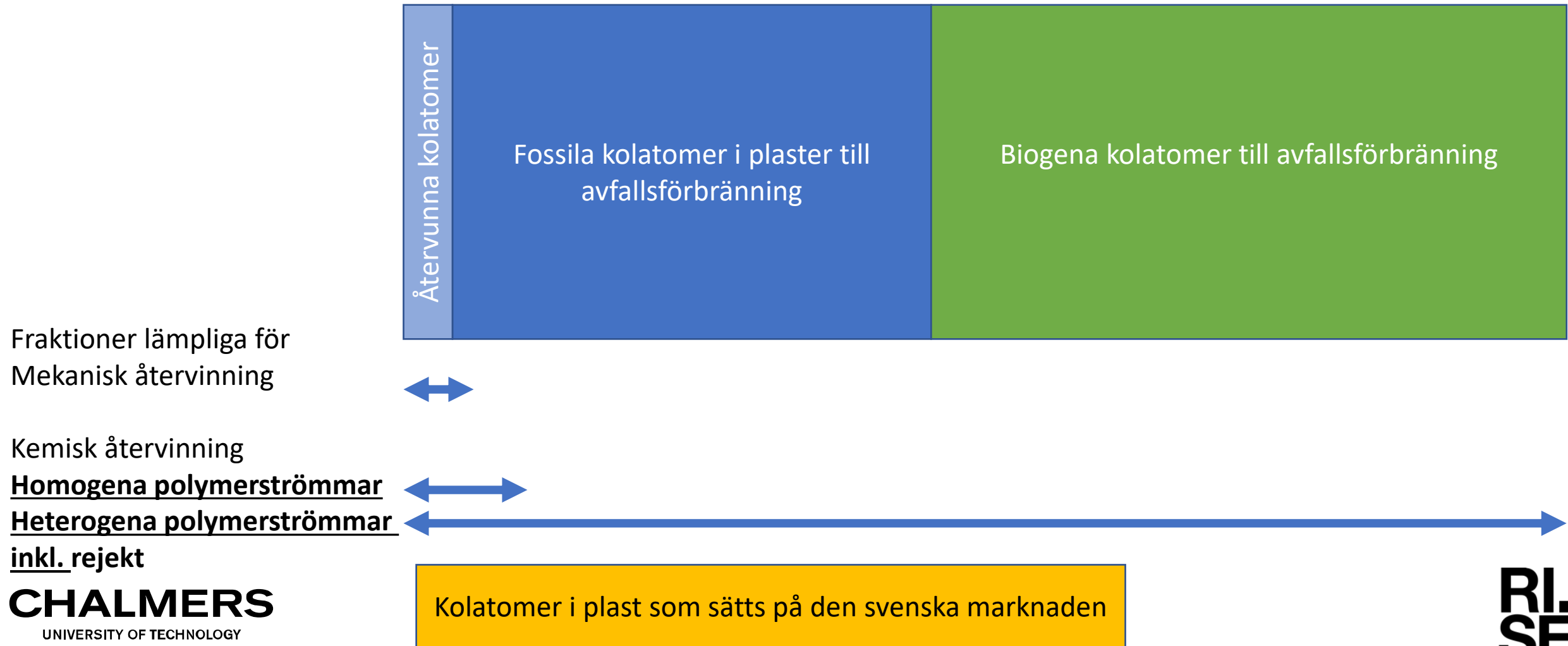
Basen för alla polymera material syntetiska eller naturliga har sitt ursprung i koldioxid



Deponiförbud av organiskt avfall

- Detta innebär att allt kol i det svenska avfallet separeras från avfallet som uppstår i det svenska samhället
- Majoriteten av kolet avskiljs från avfallet och lämnar systemet som koldioxid till atmosfären

Var hamnar kolatomerna i avfallet idag och vad är potentialen för de olika återvinningsteknikerna?

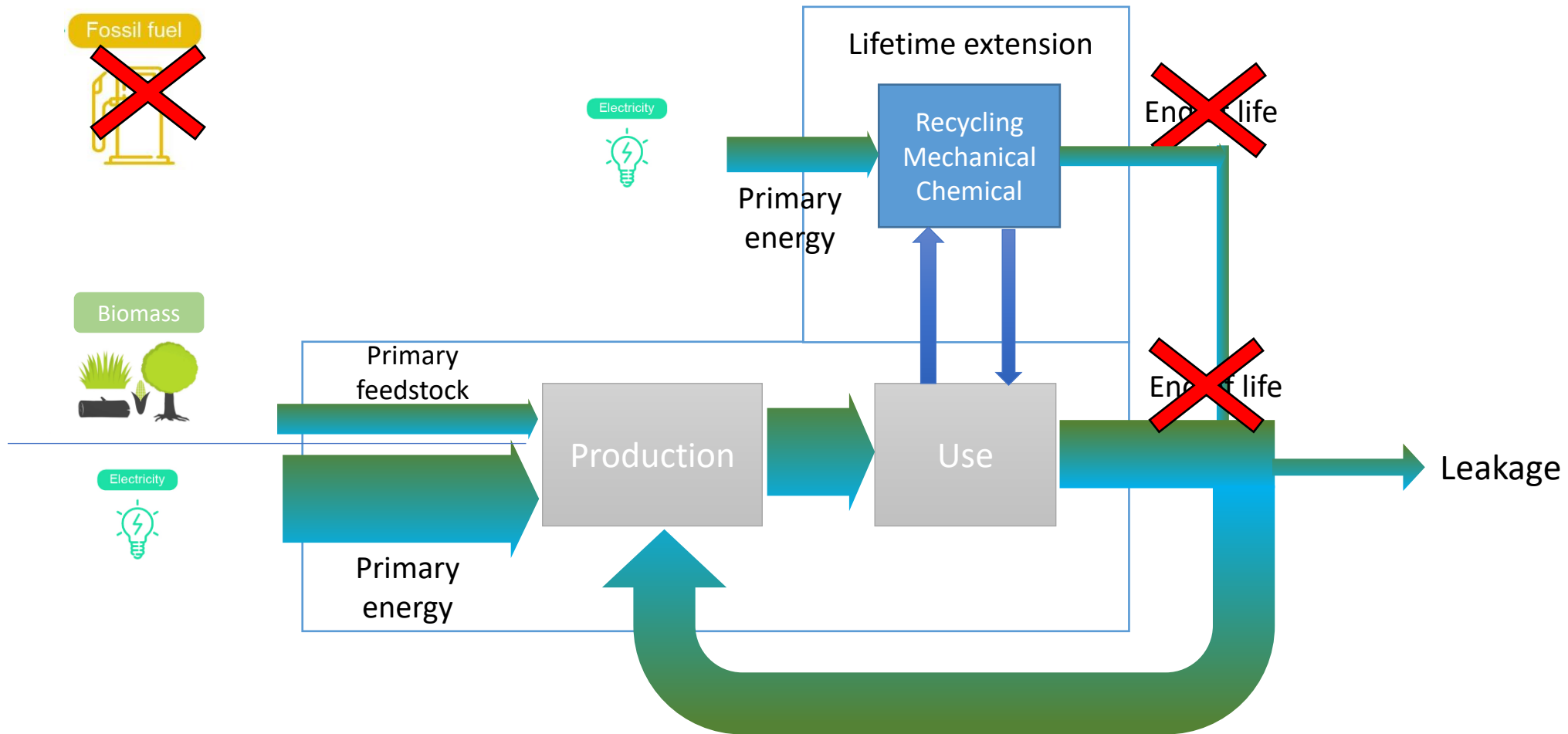


Kolatomer Svenska avfallsanläggningar i kton/år

Kolatomer i plast som sätts på Svenska
marknaden ~1200 kton C/år

Avfallsförbränning i Sverige	Kolatomer	Andel Bio	Kumulativ Kolatomer	Kum. andel Bio	Kum. Avfall
1 Högdalen	215	60%	215	60%	13%
2 Linköping	165	55%	380	58%	22%
3 Malmö	163	54%	542	57%	32%
4 Västerås	148	61%	690	58%	40%
5 Göteborg	146	61%	837	58%	49%
6 Uppsala	100	50%	937	57%	55%
7 Jönköping	101	81%	1038	60%	61%
8 Norrköping	69	61%	1107	60%	65%
9 Helsingborg	63	62%	1170	60%	69%
10 Lidköping	59	22%	1229	58%	72%
11 Umeå	58	61%	1287	58%	75%
12 Brista	55	61%	1341	58%	79%
13 Sundsvall	50	60%	1392	58%	82%
14 Eksjö	48	61%	1440	58%	84%
15 Halmstad	47	50%	1487	58%	87%
16 Boden	45	54%	1532	58%	90%
17 Kumla	42	18%	1575	57%	92%
18 Uddevalla	37	60%	1611	57%	94%
19 Borås	32	61%	1643	57%	96%
20 Karlskoga	23	61%	1666	57%	98%
21 Skövde	17	40%	1683	57%	99%
22 Kiruna	16	61%	1700	57%	100%
23 Norska Köping	6	60%	1706	57%	100%
24 Nybro	1	61%	1707	57%	100%
25 Karlstad	1	61%	1708	57%	100%

Kolet i avfallet räcker med råge för att ersätta den fossila råvara de plaster och kemikalier vi använder



Kemisk återvinning

Homogena polymerströmmar

**Fysikalisk återvinning (lösnings-
medel. sep.)** (100-250 °C)

Slutprodukt: **polymer**

Depolymerisering (200-250 °C)

Slutprodukt: **monomerer**

Solvolys/HTL

(200-400 °C, 5-25 MPa)

Slutprodukt: **oljeprodukt**

Pyrolys (400-600 °C)

Slutprodukt: **oljeprodukt**

Heterogena polymerströmmar inkl. rejekt

Högtemperatur pyrolys
/Förgasning/CCU

(700-1300 °C)

Slutprodukt: **Primärråvara**
kemiindustri

Temperatur



Kemisk återvinningstekniker och preferens för olika polymerer

LDPE, HDPE, PP, PS

PA, PET, PC, PU

**Rejekt och
blandat avfall**

Fysikalisk återvinning (lösningsmedelsbaserad separation) (100-250 °C)

Slutprodukt: **polymerer**

Depolymerisering (200-250 °C)

Slutprodukt: **monomer**

Solvolys/HTL 200-400 °C, 5-25 MPa

Slutprodukt : **olja**

Pyrolysis (400-600 °C)

Slutprodukt : **olja**

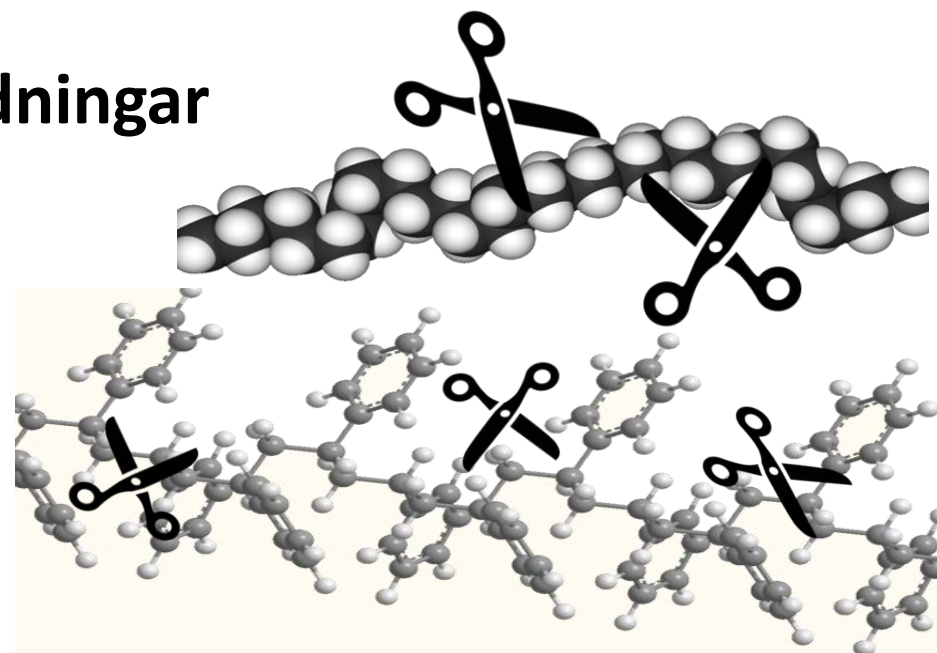
Kemisk återvinning – bryter kemiska bindningar

"molekylsax" för polymerer

Additions polymerer

LDPE, HDPE, PP, EPS, XPS

- Kolvätepolymerer
- Slumpmässig klyvning
- Produkt blandningar av korta kolväten och aromater



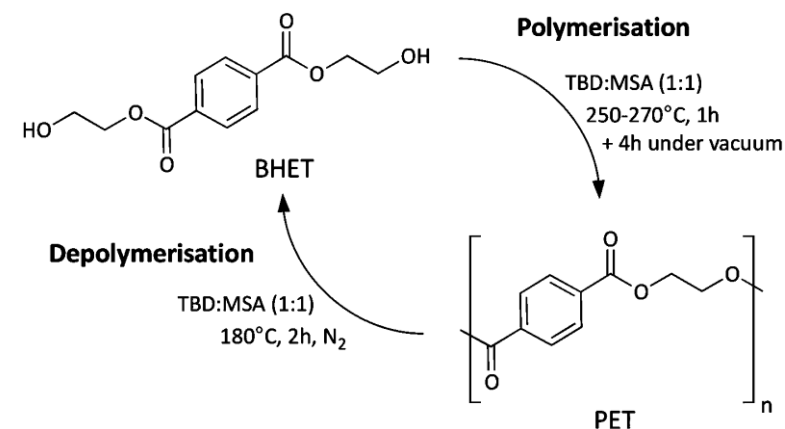
Kondensations polymerer

PET, PA, PC, PU

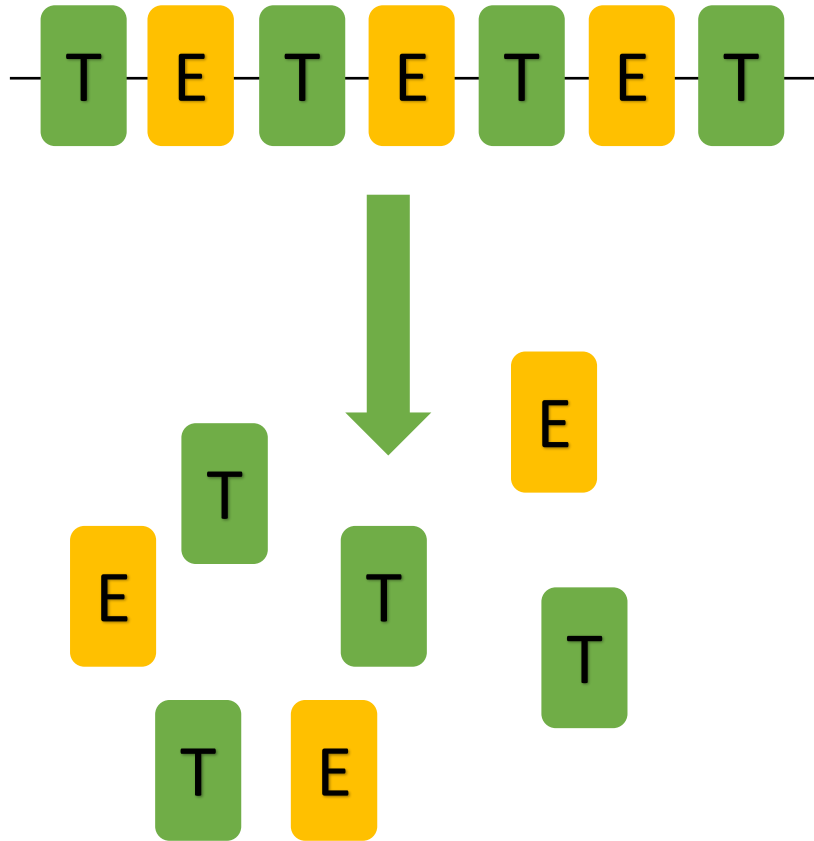
- Omvänd polymerisationsreaktion
- Kemisk bindning klyvs selektivt
- Produkt: monomerer

SVHCs och organiska additiv

- extraherade eller nedbrutna



Depolymerisering av PET och Polyester



PET

- Repetitiv polymer
 - Kemiskbinding: ester
- Två kemiska byggblock (Monomer)
 - Tereftalsyra (T)
 - Etylenglykol (E)



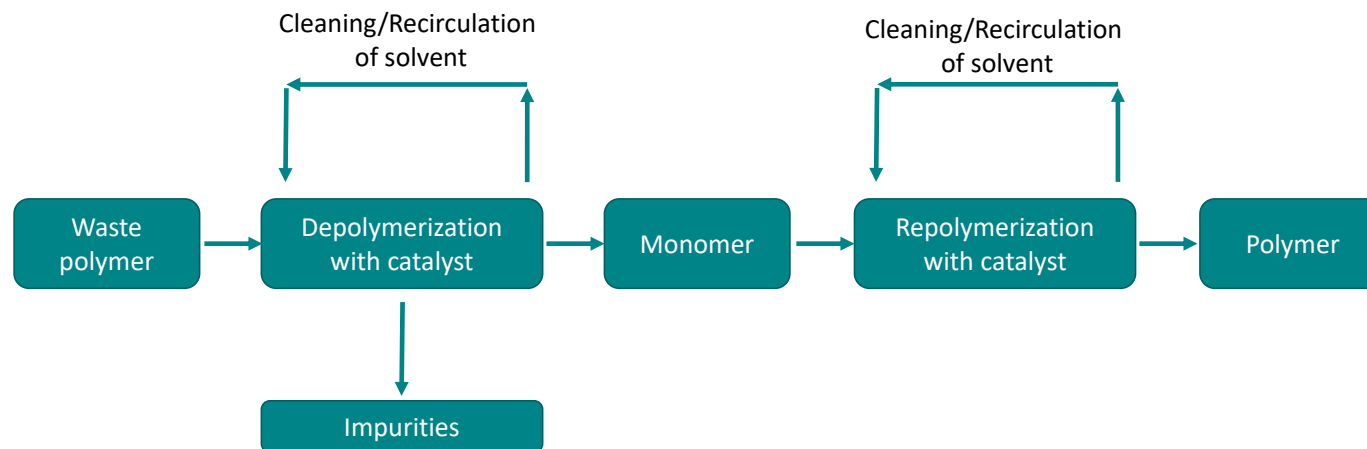
Låg temperatur solvolys - Depolymerisering

- **PET och polyester**
 - En polymer
 - “relativt ren”
- **Glykolys (etylenglykol), metanolys (metanol) och hydrolys (vatten)**
 - Selektiv katalysator
 - Bryter esterbinding
- **160-250 °C**
- **Industriella initiativ**
 - Eastman, Jeplan, Indorama, Axens, Loop Industries, Garbo, Ioniqa, CuRe, Carbios etc



Depolymerisering

- Bryter ner polymerer till sina monomerer (byggstenar) med kemi, lösningsmedel och värme (200-250 °C)
- **Lämpliga plaster: PET, PA, PU, PC**
- **Huvudprodukt:** monomer (70-95%). Tillverkning av polymer för användning i plast- eller textilprodukter.
- **Organiska farliga ämnen** separeras eller bryts ner i processen.
- **Oorganiska ämnen** är inte önskvärda men kan separeras i processen
- **Medium - Hög TRL, flera anläggningar är under uppbyggnad i EU/världen**
 - PET/polyester är huvudfokus
 - Klassisk kemisk processteknik används
 - Nationella forskningsprojekt färgade PET/polyester med RISE/Perstorp med flera partners



Avfallsström:

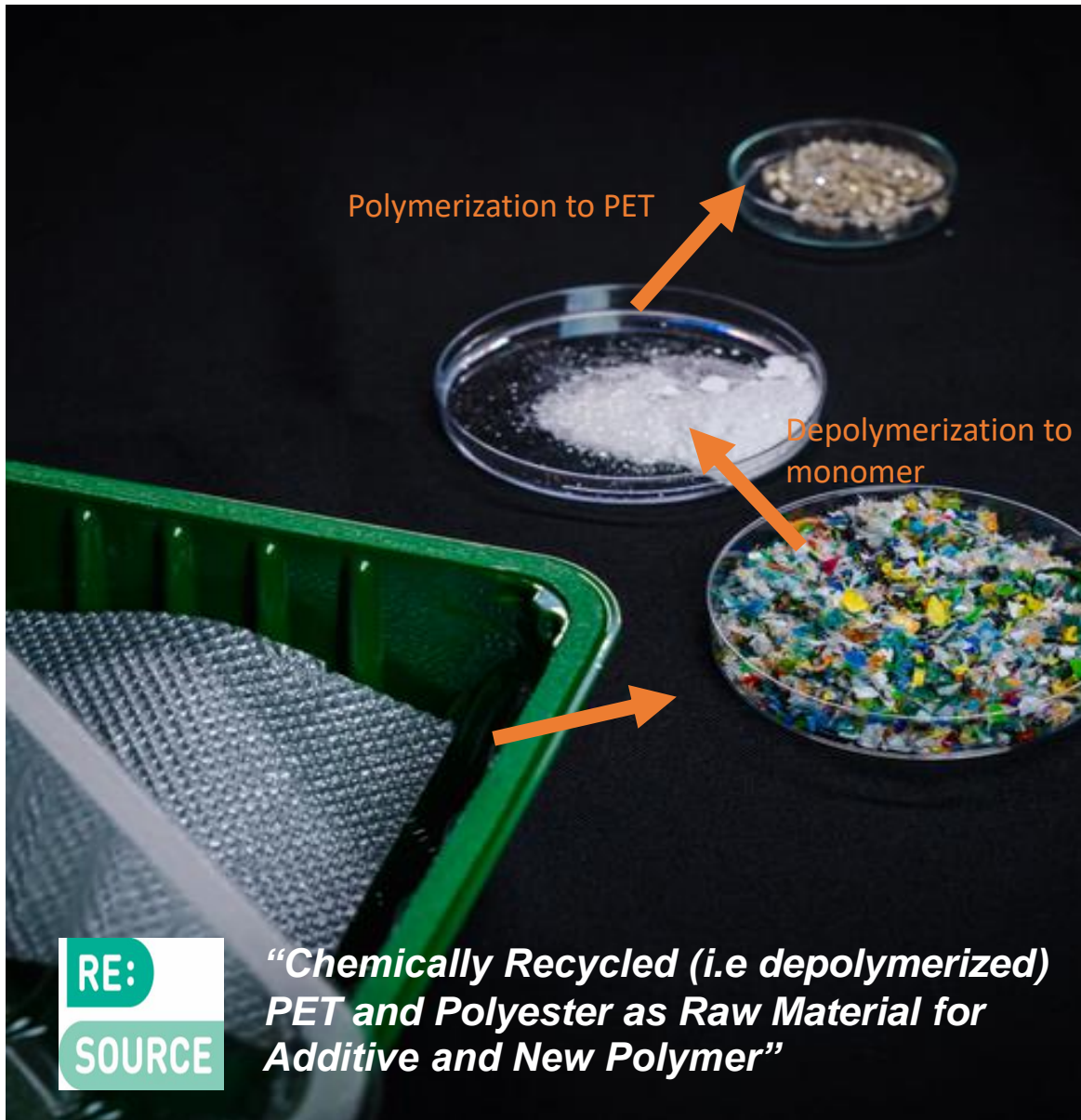
- Färgad PET
- PET med barriärmaterial
- Polyester textil

Slutsats: Behöver majoritet av en polymer för ekonomiskt möjlig återvinningsprocess.

PET och Polyester depolymerisering

Högkvalitativa produkter

- Polyester tråd
- Additiv till golv



RE:
SOURCE

*“Chemically Recycled (i.e depolymerized)
PET and Polyester as Raw Material for
Additive and New Polymer”*

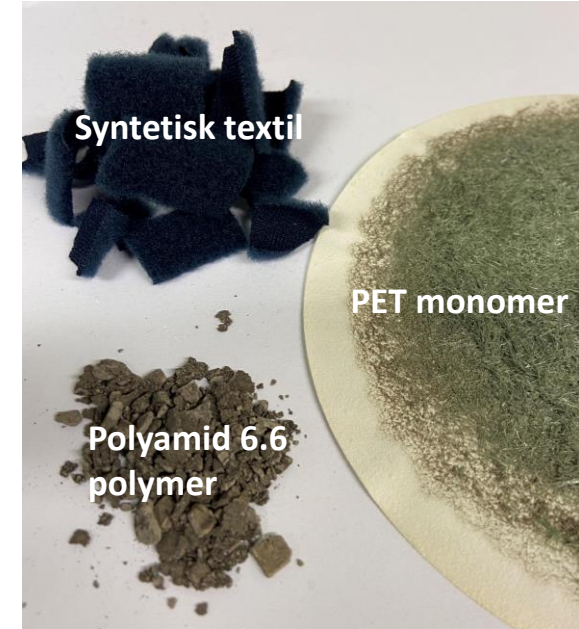
Kemisk återvinning av syntetiska textilier – RE:MIX III

Separation av syntetiska textilier i två process steg:

1. Fysikalisk återvinning av nylon i polyetylenglykol (165 °C)
1. Kemisk återvinning PET med katalytisk glykolyt (230 °C)



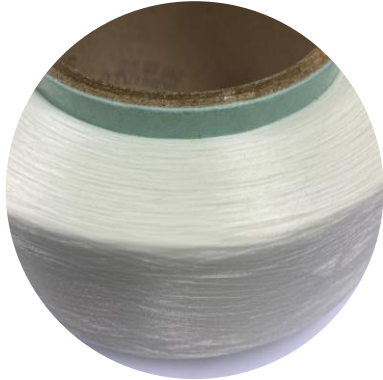
Polyester (PET, PES)
Nylon (PA)
Elastan (stretch)



Polyester



Elastan



Nylon



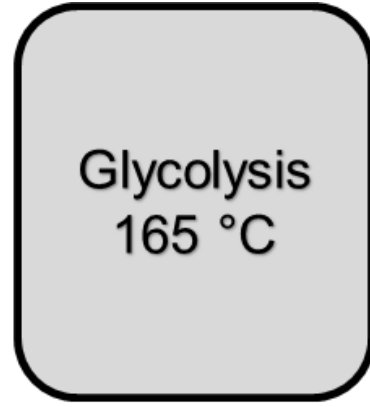
Polyester



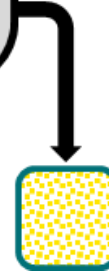
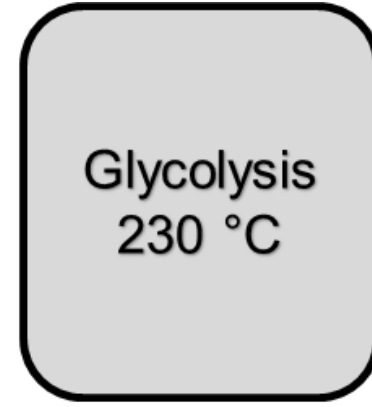
Elastane



Nylon



Separering av nylon i etylenglykol vid 165 °C



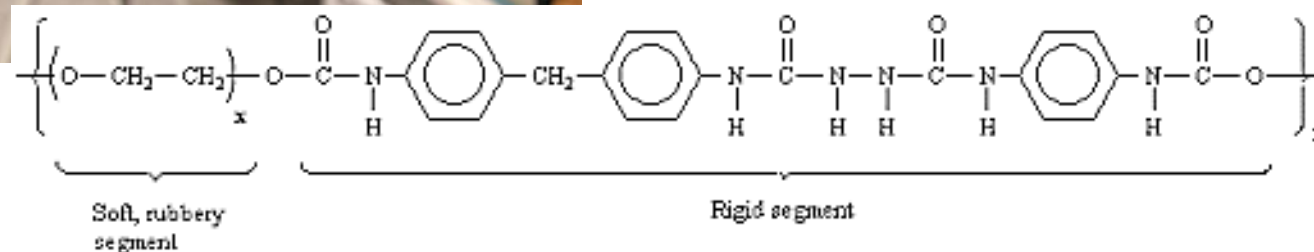
Komplett depolymerisering av polyester i etylenglykol med hjälp av katalysator

Fullständig nedbrytning av elastan i etylenglykol med hjälp av katalysator



Elastan en utmaning!

- **Placering i fiber**
 - Elastan vävs in i tyget. Placeras i mitten av fibern för att skyddas från miljöskador
 - Svårt att detektera den kemiska sammansättningen i post-konsument textilier
- **Kemisk återvinning ger en blandning av kemiska byggstenar**
 - Olika märken har olika kemisk sammansättning med olika reaktivitet
 - Kontaminering av slutprodukt BHET-monomer från polyestern



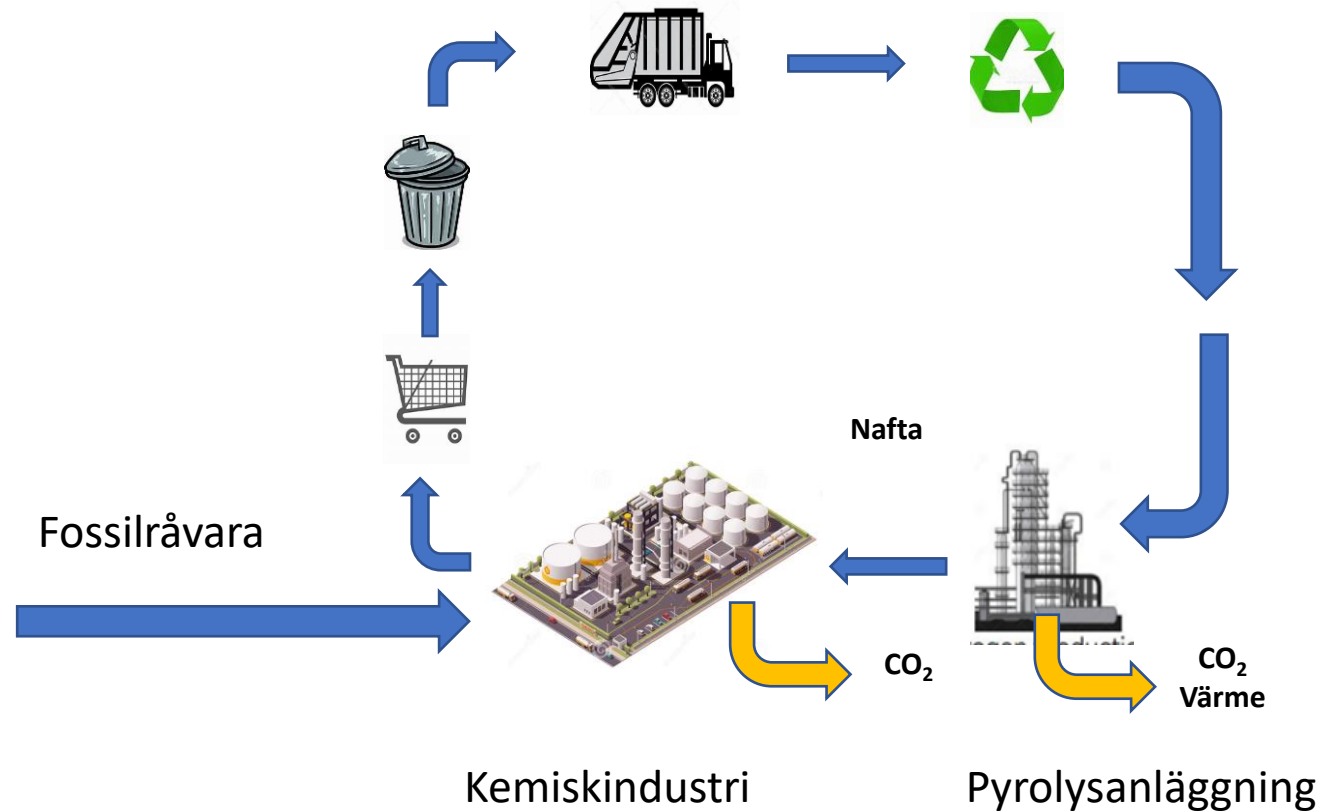


Summering RE:MIX III

- Polyester/nylon/elastan blandningar separeras och återvinns som polyestermonomer BHET och nylon
- 2 temperatursteg, ett lösningsmedelsystem; etylenglykol
- Elastan bildar inte giftiga nedbrytningsprodukter när de depolymeriseras i etylenglykol

Pyrolysis

Råvara välsorterade blandningar av främst PE/PP/PS, syftar till att producera syntetisk nafta som kan ersätta fossilnafta i kemisk industri.



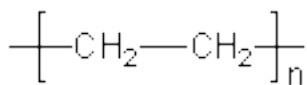
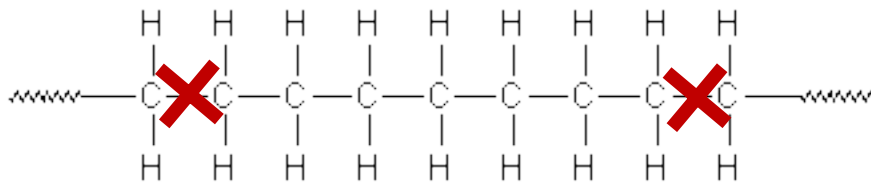
Princip för processen

Steg 1

Platen värms snabbt upp till ca 500C vilket bryter ner polymeren till kolkedjor av motsvarande längd som nafta.

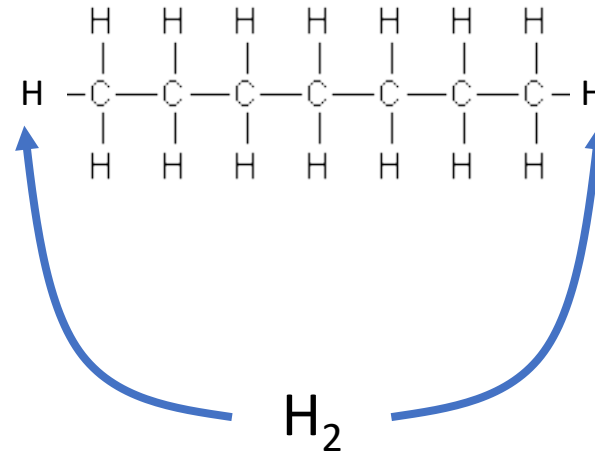


poly-eten



Steg 2

Kolkedjorna som bildas måste mättas med väte för att kunna användas i samma processer som i dag använder nafta. Hydreringen tar även bort oönskade atomer tex syre.



Alla store kemiska industrier har just nu satningar riktade mot att producera syntetisk nafta



Quantafuel anläggning i Danmark

Table 8

Review of some commercial pyrolysis technologies.

Licensor	Investor	Feedstock	Products	Capacity (kt·year ⁻¹)
Plastic Energy	Plastic Energy	Waste polyolefins, PS	Hydrocarbon oil	20–25
Fuenix Ecogy	Dow	Waste polyolefins	Light olefins and chemicals	100
Nexus	Shell	Plastic wastes	Chemicals	1000*
Neste	Ravago, Remondis	Plastic wastes	Commercial fuels	200**
Quantafuel	BASF	Plastic wastes	Light olefins and chemicals	16
VadXX	VadXX	Plastic wastes	Syncrude, diesel	20
Cynar	Cynar	Plastic wastes	Hydrocarbon oil	7
Agilyx	INEOS Styreneution	Waste PS	Styrene	36.5
Brightmark Energy	BP	Plastic wastes	Diesel, naphtha, industrial wax	100
BlueAlp	BlueAlp	Plastic wastes	Valuable oil	20

* to be installed by 2025.

** to be installed by 2030.

Råvara en stor utmaning för storskalig återvinning via pyrolysis

Riktat in sig på PE/PP vilka även är attraktiva för mekanisk återvinning



Kemisk återvinning

Homogena polymerströmmar

Fysikalisk återvinning (lösningsmedel. sep.) (100-250 °C)
Slutprodukt: **polymer**

Depolymerisering (200-250 °C)
Slutprodukt: **monomerer**

Solvolys/HTL
(200-400 °C, 5-25 MPa)
Slutprodukt: **oljeprodukt**

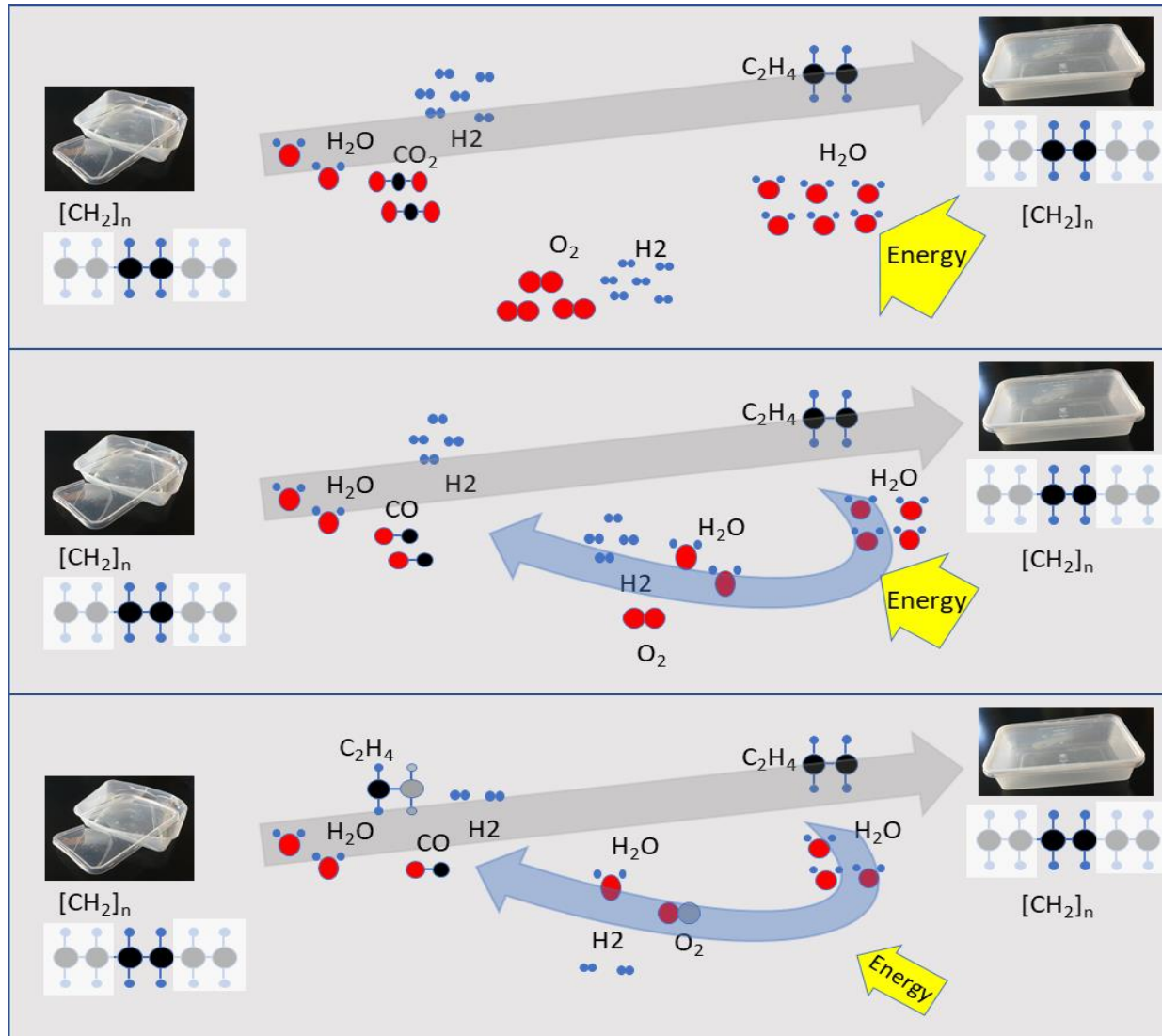
Pyrolysis (400-600 °C)
Slutprodukt: **oljeprodukt**

Heterogena polymerströmmar inkl. rejekt

Högtemperatur pyrolysis /Förgasning/CCU
(700-1300 °C)
Slutprodukt: **Primärråvara kemiindustri**

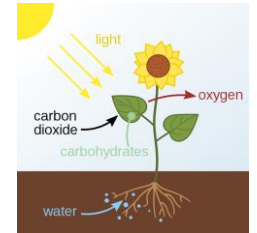
Temperatur





Återvinningsmetod

Carbon Capture and Use (CCU)
Återvinning via CO_2



Förgasning
Återvinning via syngas
($CO/CO_2/H_2$)

Högtemperatur pyrolys
Återvinning via olefiner och syngas



VCR | Varennes Carbon Recycling

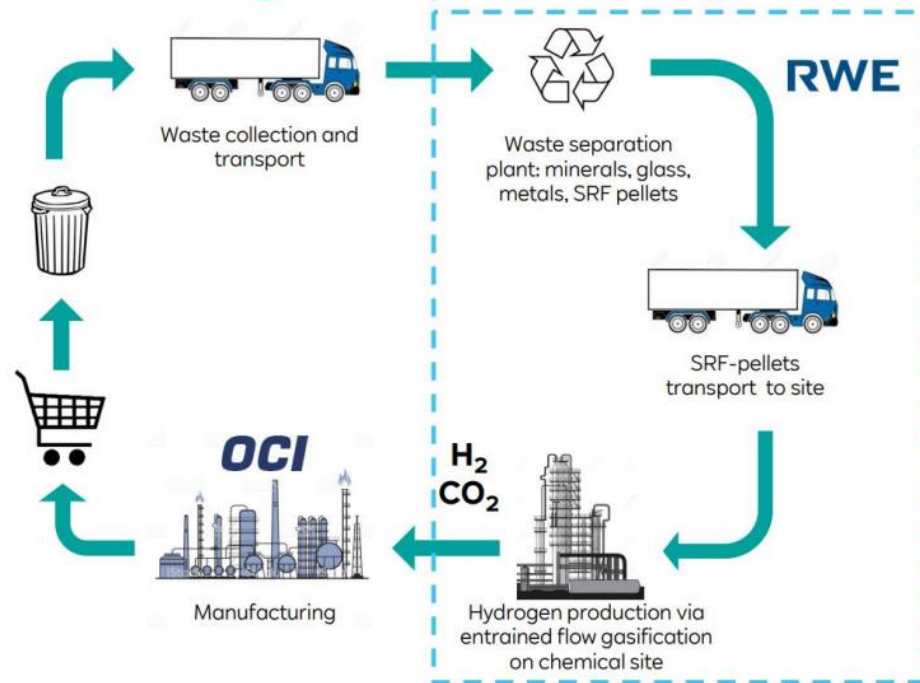
VARENNES CARBON RECYCLING (VCR)

Capacity:	125 million litres of MeOH per year (1x standard Enerkem system with H2 import) includes 87 Mwe electrolyser supplying H2 and O2
Feedstock:	200,000 dry tonnes of non-recyclable waste
Other benefits:	500 jobs during construction 100 permanent direct skilled operational roles CAD \$85m of annual benefits for Québec



Furec - RWE

Waste-to-hydrogen produces green and circular hydrogen Contributing to Project FUREC („Fuse Reuse Recycle”)



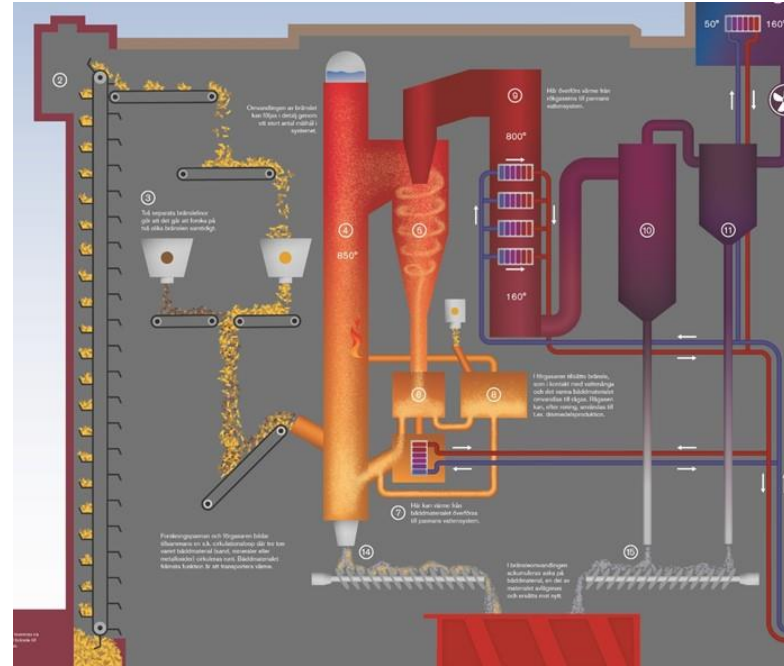
Project typicals

- Processing of Municipal Solid Waste and dried sewage sludge (700.000 t/a)
- Production of hydrogen (≈50.000 t/a)
- CO₂ reduction:
 - 475.000 t/a @ 0 kg/MWh Power
 - 330.000 t/a @ 180 kg/MWh Power
- 800.000 t/a of CO₂ pure, ready for CCS/CCU
- Estimated investment: >500 M€
- Other positive value products: minerals / glass / metals / slag / sulfur / salt
- Commissioning: 2026

Permitting in progress
Planning on track
Engineering started
Pilot MHF
construction started

Skulle möjliggöra en produktion av kring 310 000 ton primär plast från avfall, dvs återvinna 2,5 ggr plast än vi gjorde i Sverige 2021

Reactor System at Chalmers aiming for advanced pyrolysis processes

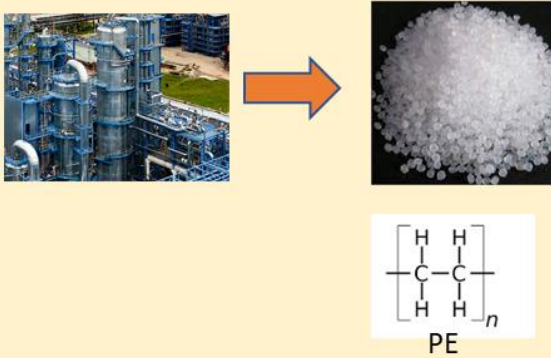


Capacity of experimental unit

Up to 10 ton a day plastic for recycling corresponding to around 500 000 plastic bags

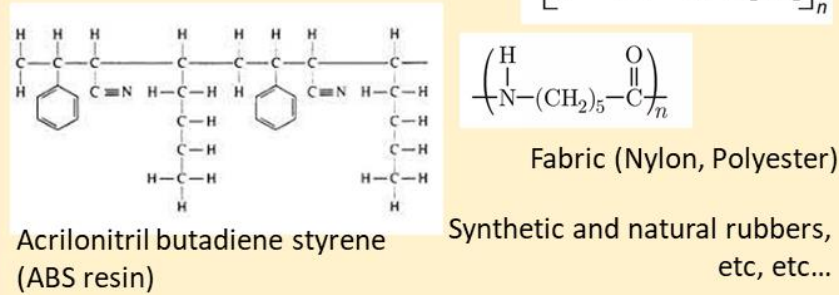
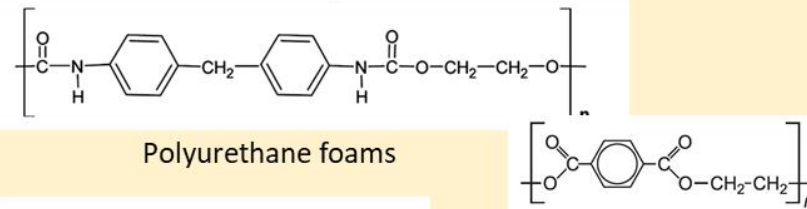
Example of investigated materials

Virgin HDPE

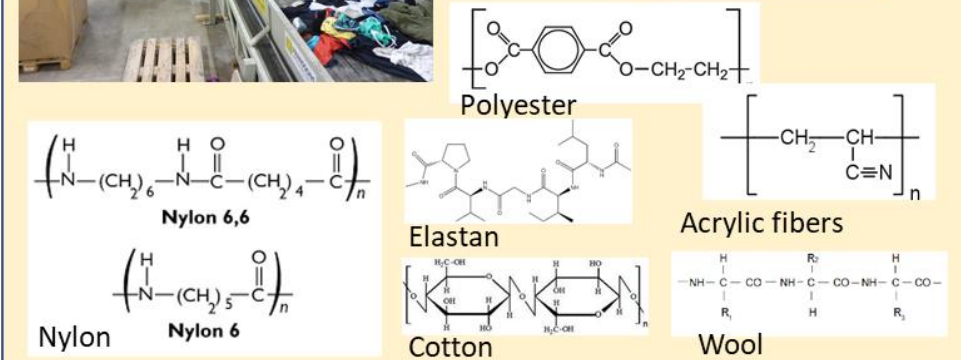
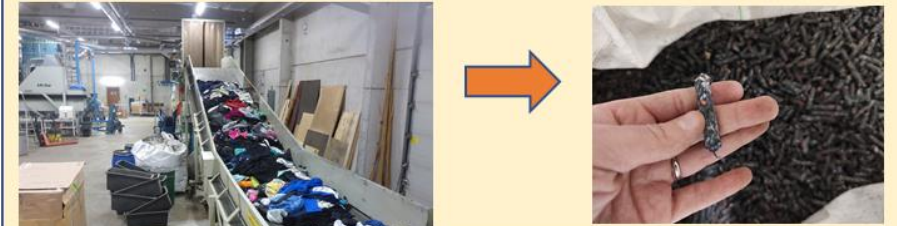


Automotive Shredder residue (ASR)

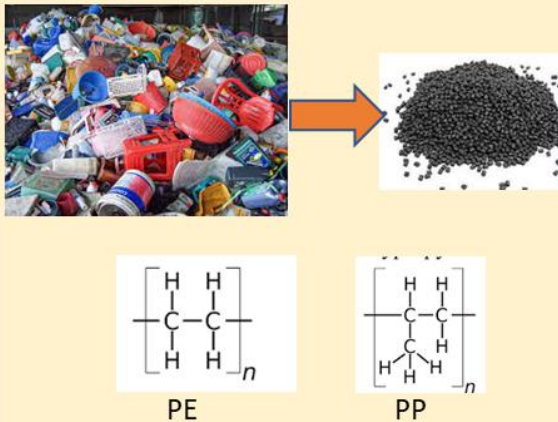
>40% ash (metals, glass)



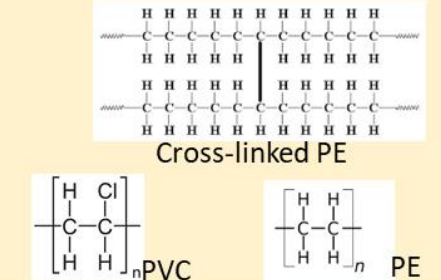
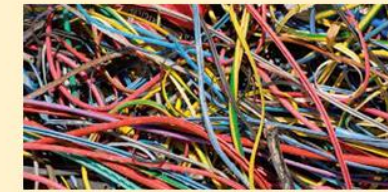
Textile residue



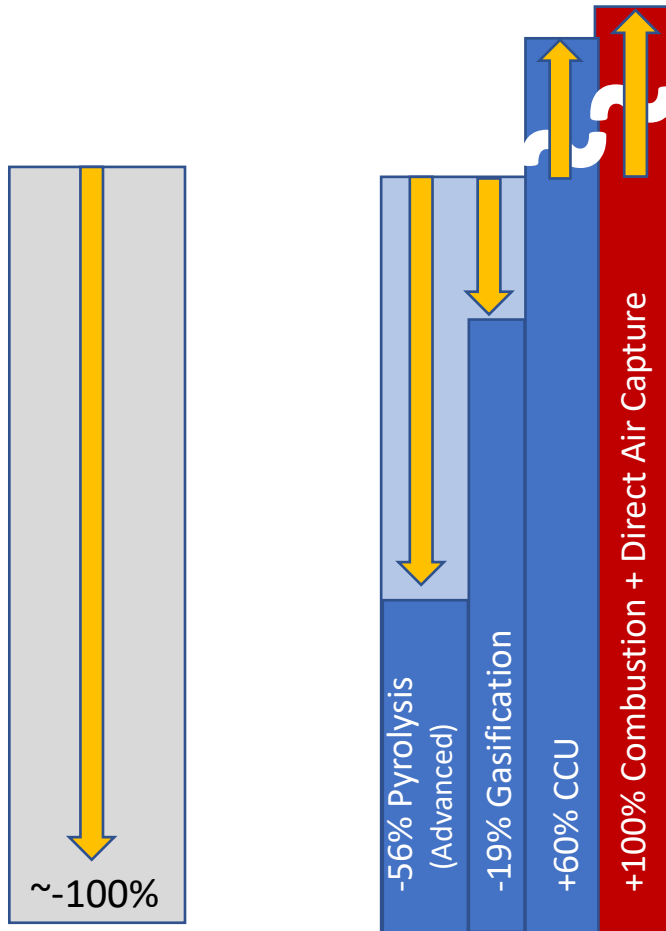
Post consumer PE/PP blend



Cable plastics

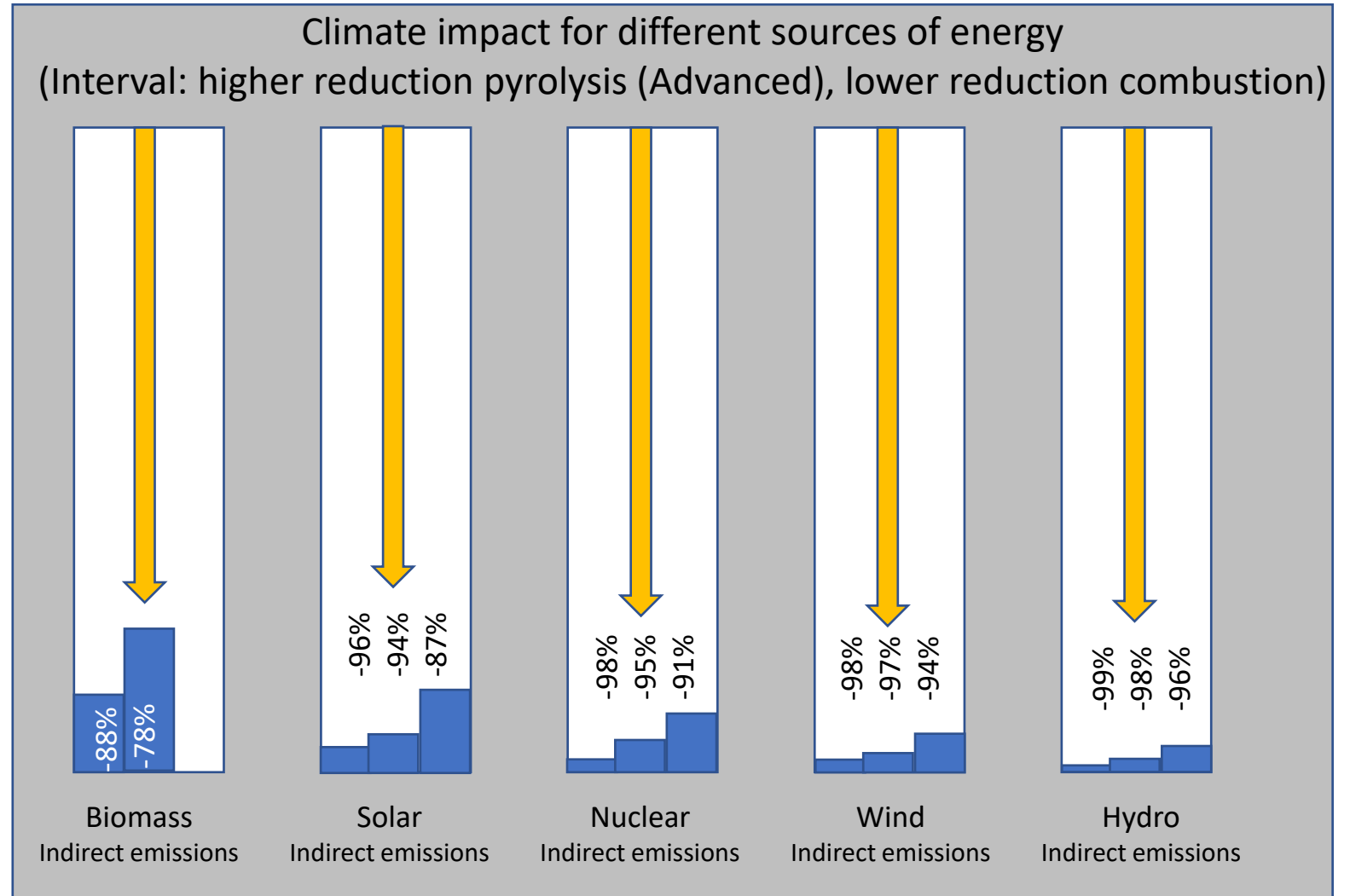


Energibehov och klimatpåverkan för återvinningsmetoder riktade mot kolatomer



Use of Virgin Fossil Carbon

Primary energy



Summering

Kemisk återvinning

Homogena polymerströmmar

**Fysikalisk återvinning (lösnings-
medel. sep.)** (100-250 °C)

Slutprodukt: **polymer**

Depolymerisering (200-250 °C)

Slutprodukt: **monomerer**

Solvolys/HTL

(200-400 °C, 5-25 MPa)

Slutprodukt: **oljeprodukt**

Pyrolysis (400-600 °C)

Slutprodukt: **oljeprodukt**

Heterogena polymerströmmar inkl. rejekt

Högtemperatur pyrolysis
/Förgasning/CCU

(700-1300 °C)

Slutprodukt: **Primärråvara**
kemiindustri

Temperatur



Sammanfattning

- Ska vi skapa en cirkulär plastanvändning i Sverige är införandet av kemiska återvinningstekniker avgörande
- Kemiskåtervinning återvinner plast till ursprunglig kvalitet och till den polymer som olika industriella aktörer efterfrågar för att deras produkter ska få den funktion som efterfrågas
- Det är vi som bestämmer om kolatomerna som går in i avfallet ska gå tillbaka till produkter eller om de ska lämna systemet som koldioxid
- Anläggningar för kemiskåtervinning är nu på gång runt om i världen där ett antal är i en skala som överstiger hela dagens Svenska plaståtervinningen