



CHALMERS



Post-consumer textilier - avfall eller resurs?

Undersökning av post-consumer textilier med fokus på termokemisk återvinning

Kandidatarbete inom Rymd-, geo- och miljövetenskap; Mekanik och maritima vetenskaper; Kemiteknik

AMANDA AGNÉUS
EVA DAHLQVIST
MARTA FOJT
PHILIP JONSSON
LINNEA NILSSON
EMMA ÅKESSON

INSTITUTIONEN FÖR RYMD-, GEO- OCH MILJÖVETENSKAP

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2021

www.chalmers.se

KANDIDATUPPSATS 2021

Post-consumer textilier - avfall eller resurs?

Undersökning av post-consumer textilier med fokus på termokemisk
återvinning

Amanda Agnéus

Eva Dahlqvist

Marta Fojt

Philip Jonsson

Linnea Nilsson

Emma Åkesson



CHALMERS

Institutionen för rymd-, geo- och miljövetenskap

Avdelningen för Energiteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2021

Undersökning av post-consumer textilier med fokus på termokemisk återvinning
AMANDA AGNÉUS
EVA DAHLQVIST
MARTA FOJT
PHILIP JONSSON
LINNEA NILSSON
EMMA ÅKESSON

© AMANDA AGNÉUS, EVA DAHLQVIST, MARTA FOJT, PHILIP JONSSON,
LINNEA NILSSON, EMMA ÅKESSON, 2021.

Handledare: Isabel Cañete Vela, Institutionen för rymd-, geo- och miljövetenskap
Examinator: Martin Seemann, Institutionen för rymd-, geo- och miljövetenskap

Kandidatuppsats 2021, SEEX15-21-10
Institutionen för rymd-, geo- och miljövetenskap
Avdelningen för Energiteknik
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Alyssa Strohmman, Unsplash, Hämtad från: https://unsplash.com/photos/TS--uNw-JqE?fbclid=IwAR35o-hLcPuy3F4yV67Aj2e5SNA5uL8RZoCD_MJMdwpf9TJoFEoyvLN9gSw

Abstract

The textile consumption has increased rapidly during recent years which has led to a large impact on the environment and people. Therefore, there exists a need for further knowledge in the handling of post-consumer textiles, such as what to do with the waste and how to minimize this waste. The upcoming extended producer responsibility for textiles in Sweden will amount to an increased collection of textiles and is an important incentive for the development of recycling processes. Currently, only mechanical and chemical recycling is used. These recycling methods can however only be used for a few different fibers. This report aims to investigate post-consumer textiles, with a focus on thermochemical recycling which is a method where polymers are broken down to its base chemicals at high temperatures.

The investigation includes interviews with different leading actors in areas related to the Swedish textile industry to gain first-hand information, including producer responsibility and thermochemical recycling from their point of view. The problem of post-consumer textiles is also discussed through environmental, ethical and legal point of views, to give a holistic view of the system.

To investigate thermochemical recycling of textiles, laboratory experiments were made by pyrolysis of different blends of textiles, with the aim of getting back products with high value with regards to molecular complexity. The results from the laboratory show that a wide range of different chemical products can be obtained through thermochemical recycling. The main products have different areas of use and further investigations have to be made to determine the value of the products more thoroughly and to study the environmental benefits of thermochemical recycling.

A conclusion that can be drawn from the report is that different recycling methods, including thermochemical, need to be used together to reach the Sustainable Development Goals created by the UN. An important part of this transition is the extended producer responsibility. Another conclusion from the report is that clothes need to have a longer user phase. A transition to a circular textile industry does not come without ethical consequences of which the impact needs to be assessed and prevented.

Keywords: Textile recycling, thermochemical recycling, pyrolysis, polyester, polyamide, elastane, post-consumer textiles, extended producer responsibility, circularity, waste framework directive

Sammanfattning

Konsumtionen av textilier har ökat drastiskt de senaste åren vilket har lett till stor påverkan på miljö och människor. Därför finns ett behov för ytterligare kunskap i hanteringen av post-consumer textilier, till exempel vad som skall göras med avfallet och hur detta avfall ska minimeras. Det kommande producentansvaret för textilier i Sverige innebär en ökad insamling av textilier och är ett viktigt incitament för utvecklandet av återvinningsprocesser. I dagsläget används främst mekanisk och kemisk återvinning men dessa fungerar i nuläget endast för ett fåtal olika fibrer. Den här rapporten har som mål att undersöka post-consumer textilier, med ett fokus på termokemisk återvinning vilket är en metod där polymerer bryts ner till dess baskemikalier vid höga temperaturer.

Undersökningen inkluderar intervjuer med olika ledande aktörer i områden relaterade till svensk textilindustri för att få inblick i ämnet. Däribland information om producentansvar och termokemisk återvinning från industrins perspektiv. Problemen kring post-consumer textilier diskuteras utifrån miljömässiga, etiska och juridiska aspekter för att ge ett holistiskt perspektiv på systemet.

För att undersöka termokemisk återvinning av textilier utfördes laborativa experiment genom pyrolys av textilier med olika fibersammansättningar. Målet var att få tillbaka produkter med högt värde med avseende på molekylär komplexitet.

Resultaten från laborationen visade att ett brett spektrum av kemikalier kan erhållas genom termokemisk återvinning. Huvudprodukterna har olika användningsområden och ytterligare undersökningar behöver göras för att bestämma värdet på produkterna och för att undersöka om det är miljömässigt fördelaktigt med termokemisk återvinning.

Från arbetet dras slutsatsen att olika återvinningsmetoder, däribland termokemisk, kommer behöva användas parallellt för att nå FN:s globala mål. En viktig del av denna omställning är beslutet om producentansvar. En ytterligare slutsats från rapporten är att en förlängd användarfas leder till en lägre miljöpåverkan. En omställning till en cirkulär textilindustri kommer inte utan etiska konsekvenser varpå påverkan från dessa måste undersökas och förebyggas.

Nyckelord: Textilåtervinning, termokemisk återvinning, pyrolys, elastan, polyester, polyamid, post-consumer textilier, producentansvar, cirkularitet, avfallshierarkin

Förord

Många personer har hjälpt oss att förverkliga detta arbete som vi därför skulle vilja rikta särskilda tack till.

Till att börja med vill vi tacka vår handledare Isabel Cañete Vela för allt stöd och engagemang under arbetets gång. Utan dig och din insikt i ämnet hade det aldrig blivit så bra som det blev. Vi vill även tacka vår examinerator Martin Seemann för hans värdefulla kommentarer och vägledning genom arbetet.

Vi vill också rikta ett stort tack till Erik Thedin, Per Malmberg, Simon Uzoni och Jessica Bohwalli för värdefull hjälp kring laborationen och analys av prover.

Tack även till Cecilia Tall, Eva Maria Rudbäck och Ann Carlsson för att ni har ställt upp på givande intervjuer och bidragit med intressant information från era perspektiv gällande ämnet.

Slutligen vill vi tacka Hanna de la Motte för intressanta intervjuer med värdefull information, samt för ditt engagemang i arbetet.

Amanda Agnéus, Eva Dahlqvist, Marta Fojt
Philip Jonsson, Linnea Nilsson, Emma Åkesson

Göteborg, maj 2021

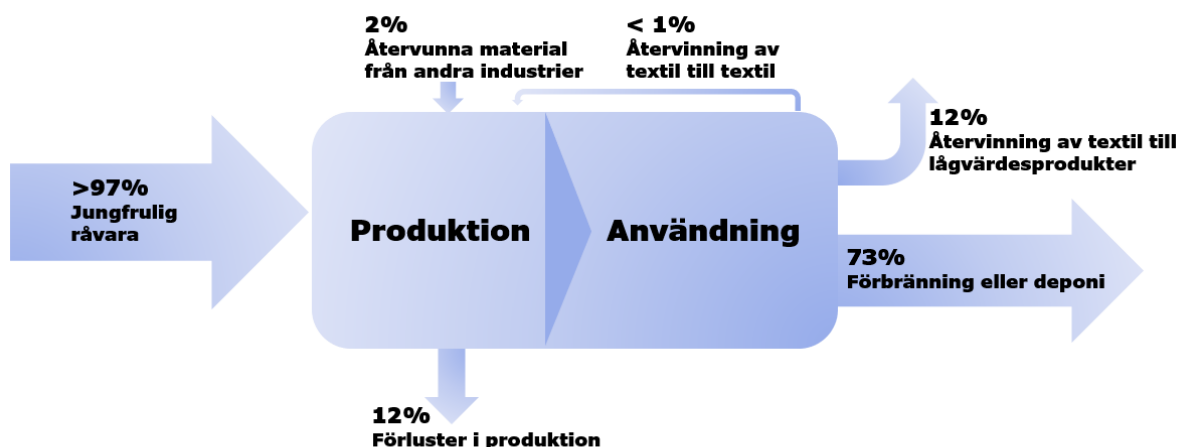
Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Syfte	3
1.2	Avgränsningar	4
1.3	Arbetets struktur	4
2	Metod	5
2.1	Intervjuer	5
3	Miljöpåverkan från textilindustrin	6
3.1	Framställning av material	6
3.2	Transport	7
3.3	Användarfas	7
3.4	Avfallshantering	8
3.5	Omställningar för en cirkulär textilindustri	8
4	Lagstiftning och Styrning	10
4.1	FN:s Globala mål	10
4.2	Producentansvar	10
5	Textilavfallshantering idag	12
5.1	Förebyggande åtgärder	12
5.2	Återanvändning	13
5.3	Materialåtervinning	14
5.3.1	Mekanisk återvinning	14
5.3.2	Kemisk återvinning	15
6	Termokemisk återvinning	17
6.1	Beskrivning av termokemisk återvinning	17
6.2	Tidigare experiment	18
6.2.1	Polyester	18
6.2.2	Nylon	20
6.2.3	Elastan	22
7	Laborativ metod	23
7.1	Pyrolys	23
7.2	Analys av laborativa resultat	24
7.2.1	μ -GC	25
7.2.2	TGA	25
7.2.3	GC-MS	25
7.2.4	GC-FID	25
8	Laborativa resultat	27

8.1	Sammanställning	27
8.2	μ -GC	27
8.3	GC-FID	28
8.4	GC-MS	29
9	Diskussion	32
9.1	Laborativa resultat och tidigare experiment	32
9.1.1	Gas	32
9.1.2	Pyrolysolja	33
9.1.3	Felkällor och möjliga förbättringar	36
9.2	Återvinning och återanvändning - idag och i framtiden	37
9.3	Fortsatt arbete	39
10	Slutsatser	40
	Referenser	41
	Bilagor	i

1 Inledning

Under de senaste två decennierna har den globala textilproduktionen mer än fördubblats [1]. I takt med att textilproduktionen ökar växer miljö- och klimatpåverkan som textilindustrin bidrar till, vilket gör textilproduktionen till ett växande problem. Årligen produceras 111 miljoner ton textilier och mer än 97% av dessa textilier tillverkas av jungfrulig råvara [1, 2]. Ungefär 2% av textilierna tillverkas från återvunna råvaror från andra industrier, exempelvis från PET-flaskor, och mindre än 1% kommer från återvunnen textil. I figur 1.1 visas en schematisk bild över textilflödena. Efter textiliernas användning hamnar 73% på deponi eller förbränns, 12% återvinns till nya produkter med lägre värde, såsom trasor eller isoleringsmaterial, mindre än 1% återvinns till nya textilier och resten förloras i olika typer av förluster under produktions- eller återvinningsstegen [2]. Det finns alltså stora flöden av textilavfall som förbränns eller hamnar på deponi, trots att det är de sista respektive näst sista stegen i EU:s avfallstrappa (vilken förklaras i kapitel 5) och endast ska tillämpas om återvinning inte är möjlig.



Figur 1.1: Schematisk bild över textilflöden

En bidragande faktor till den ökade textilproduktionen är den relativt nya affärsmodellen Fast Fashion [3]. Fast Fashion grundar sig i låga priser, ständiga nyheter och hög omsättningshastighet. Online-återförsäljare som kan erbjuda smidig och snabb leverans av nya produkter har ökat, vilket har resulterat i att klädmärken producerar nästan dubbelt så många klädkollektioner jämfört med före år 2000, då Fast Fashion-fenomenet startade. Den har blivit en stor framgång med konstant tillväxt och har utklassat de mer traditionella modebutikerna.

Den ökade konsumtionen i kombination med ökad effektivitet i produktionen av klädesplagg har lett till att priserna har sjunkit. I EU och Storbritannien har andelen klädeskostnader av totala utgifter per person minskat från 30% på 1950-talet till 12% 2009 och till endast 5% 2020. Detta har lett till att kläder köps allt mer frekvent men används färre gånger. I USA köps ett nytt klädesplagg i genomsnitt var 5,5 dag och i Europa har försäljningen av kläder ökat med 40% under tidsperioden 1996 - 2012. Utöver detta har snittet för hur länge ett plagg används minskat med 30% sedan 2005 [3].

Utvecklingsländer har i allmänhet låga tillverknings- och arbetskraftskostnader, vilket har inneburit att textilproduktion därför har flyttats till dessa länder. Denna globalisering kan leda till missförstånd i kommunikationen mellan beslutsfattare och tillverkare då de ofta inte befinner sig på samma kontinent. På grund av detta slängs textilier innan de har konsumerats, det vill säga pre-consumption waste [3].

I och med att mycket avfall uppstår inom textilindustrin är det viktigt att ha bra återvinningsmetoder för detta. Det finns dock flera faktorer som försvårar återvinningen av textil. Generalsekreteraren på Sveriges Textil- och Modeföretag berättar att ett av problemen är att alla kemikalier som ingår i textilen inte är angivna. Det finns ingen innehållsförteckning och kemikalier som används i produktionen kan också följa med plagget. Fibermärkningsförordningen beskriver materialen som ingår, och dessa märks upp på plaggets etikett, men det innefattar inte eventuellt kemiskt innehåll (E-post I2 2021-05-06). Därför behöver inte exempelvis flamskyddsmedel, färgämnen eller vattenavvisande ämnen redovisas [4]. En annan faktor är att olika textilfibrer, såsom olika syntetiska fibrer, ofta kombineras i samma plagg för att ge plagget önskade egenskaper. Då det är svårt att separera olika fibrer blir dessa blandmaterial svåra att återvinna [5].

Ytterligare en faktor som försvårar återvinningen av textilier är avsaknaden av ett bra system för att samla in och sortera textilierna. I Sverige innebär detta att större delen av textilavfallet hamnar i hushållssoporna och energiutvinns genom förbränning. I en studie gjord av Svensk miljö emissionsdata visade resultatet att under år 2015 hamnade ca 72 000 ton textilier i restavfallet och gick därmed direkt till förbränning [5]. Vid vidare analys av dessa textilier bedömdes 59% vara i sådant skick att de hade kunnat återanvändas flera gånger och 58% av textilierna var tillverkade i ren bomull. Därmed visade resultatet av studien på att betydande delar av textilierna som slängs i restavfallet hade kunnat återanvändas eller materialåtervinnas [5].

Det finns flertalet redan etablerade återvinningsmetoder för textilier, framförallt mekaniska och kemiska sådana. Dessa fungerar dock enbart för vissa fibrer, främst för bomull, polyester eller en blandning av dessa. En återvinningsmetod som ännu inte används i större skala är termokemisk återvinning. Termokemisk återvinning kan vara viktig då den antas kunna hantera kontaminerade och blandade textilier bättre än andra återvinningsmetoder. Hur termokemiska processer utförs och dess möjligheter att användas vid återvinning undersöks mer i kapitel 6.

1.1 Syfte

Rapportens syfte är att undersöka hanteringen av post-consumer textilier, med det primära fokuset att studera termokemisk återvinning. Målet är att undersöka problematiken kring textilavfallets hantering idag och vilken roll termokemisk återvinning kan spela. På grund av komplexiteten i problemet ska hänsyn tas till olika synvinklar, däribland miljömässiga, etiska, juridiska och tekniska. Detta för att ge en övergripande bild.

Arbetet ämnar att undersöka

- Miljöpåverkan från de olika delarna i textiliers värdekedja och omställningen mot en cirkulär ekonomi
- De globala målens koppling till hanteringen av textilavfall
- Det framtida producentansvaret i Sverige för textilier
- Nuvarande återvinningsprocesser och deras tekniska begränsningar
- Termokemisk återvinning av blandtextilier och vilka kemikalier som kan erhållas
- Vilken roll termokemisk återvinning spelar för framtidens textilavfallshantering

Projektet ämnar även att utföra laborativt arbete på termokemisk återvinning av blandmaterial. Syftet är att få tillbaka produkter med högt värde i avseende på komplexitet. Laborationen ämnar även att jämföra material med olika sammansättningar av syntetfibrer för att se vilka skillnader i resultat detta medför.

1.2 Avgränsningar

I projektet har inte sortering av textilavfall berörts och hur detta bäst kan utföras. Detta är ett viktigt problem att lösa för att logistiken kring återvinningen ska kunna fungera. Det har inte heller undersökts hur isärplockning av plagg för att avlägsna t.ex. knappar och blixtlås ska genomföras, då endast textilier utan dessa delar är önskvärda i återvinningen. I rapporten har inte heller tillsatser i kläder, så som färgämnen och flammskyddsmedel, och vilka problem dessa kan medföra undersökts. Inte heller de problem som tryck på textilierna kan påbrंगा undersöktes. Alla dessa är problem som behöver lösas för att göra textilåtervinning genomförbart.

Genom laborationen i arbetet har det undersökts vilka ämnen som erhålls vid en typ av termokemisk återvinning men inte hur dessa kan separeras. För att produkterna ska ha något värde måste dessa kunna separeras till en hög renhet.

En ytterligare avgränsning för projektet är att det inte har gjorts några beräkningar på hur mycket utsläpp och material som sparas vid termokemisk återvinning. Detta måste göras för att kunna ta beslut om metoden är miljömässigt bra eller inte, speciellt för att jämföra med andra återvinningsmetoder. Det har inte heller genomförts några beräkningar på kostnader varpå projektet inte kan visa på huruvida termokemisk återvinning är ekonomiskt hållbart eller ej.

1.3 Arbetets struktur

De inledande kapitlen, 3 och 4, ger en grundläggande beskrivning av miljöpåverkan från textilindustrin samt befintlig och kommande lagstiftning gällande detta. Kapitel 5 syftar till att beskriva hur textilavfall hanteras i nuläget och vilka återvinningsmetoder som finns. Därefter beskrivs termokemisk återvinning mer ingående i kapitel 6. Metoden för laborationen beskrivs i kapitel 7 och dess resultat presenteras i kapitel 8. I kapitel 9 diskuteras resultatet och vad som bör göras framåt inom området och avslutningsvis presenteras slutsatserna i kapitel 10.

2 Metod

Arbetets metod bestod i huvudsak av två delar, dels intervjuer som beskrivs nedan och dels laborativt arbete som beskrivs i kapitel 7.

2.1 Intervjuer

Videointervjuer hölls med olika aktörer inom textilbranschen med syfte att komplettera den litteraturgenomgång som gjordes. De intervjuade var

- Logistikansvarig på Röda Korset (Intervjuperson 1, I1).
- Generalsekreteraren på Sveriges Textil och Modeföretag, TEKO (Intervjuperson 2, I2).
- Filosofie doktor och tillförordnad Affärs- och Innovationsområdeschef för materialomställning på RISE Research Institutes of Sweden (Intervjuperson 3, I3)
- Sustainability Manager på Blåkläder (Intervjuperson 4, I4)

Syftet med intervjun med I1 var att få information om second hand-marknaden i Sverige och deras syn på omställning till en mer cirkulär textilanvändning. I2 fick frågor om producentansvar för textil i Sverige och hur branschen ser på denna förändring. I3 svarade på mer tekniskspecifika frågor gällande olika återvinningsprocesser. I4 intervjuades med syfte att få svar på mer detaljerade frågor gällande arbetskläder då dessa kläder används i mycket mer förorenade miljöer än konventionella kläder och har en specifik målgrupp.

3 Miljöpåverkan från textilindustrin

Miljöpåverkan från textilindustrin sker på flera ställen i textiliernas livscykel. Totalt sett beräknades textilproduktionen stå för 2% av de globala växthusgasutsläppen och det användes 93 miljarder kubikmeter vatten år 2015 [2]. Nedan diskuteras miljöpåverkan från framställningen av material, transport, användarfas och avfallshantering. Ett sätt att lösa problemen från den linjära textilindustrin är att gå mot ett mer cirkulärt system vilket också diskuteras nedan.

3.1 Framställning av material

Den ökande produktionen av textilfibrer har stor påverkan på miljön och klimatet eftersom produktionen kräver stora resursflöden av råvaror, vatten, energi och kemikalier [5]. Forskning har visat att produktion av textilier står för den största miljöpåverkan under ett klädeslaggs livscykel [5].

I dagsläget används flera olika naturfibrer och konstfibrer i textilier. De absolut vanligaste är bomull och polyester. Under 2018 producerades 54 miljoner ton polyester, vilket utgör 51% av den totala textilproduktionen [3]. Motsvarande siffra för bomull var 26 miljoner ton, vilket innebär 25% av den totala textilproduktionen [3]. Polyamid, där nylon är inkluderat, är den näst mest använda syntetiska fibren. År 2018 producerades 6.1 miljoner ton polyamid [3]. En annan viktig syntetisk fiber för textilproduktion är elastan [6]. Elastanproduktionen 2018 var 850 000 ton [7].

För att odla ett kilo bomull går det åt ungefär 10 000 liter vatten [8]. Det har bidragit till att exempelvis Aralsjön i Centralasien mellan åren 1960-2000 minskade i volym med 80% [9]. Odlingen kräver även stora mängder bekämpningsmedel som kan spridas via luft och vatten, vilket kan leda till hälsoproblem såsom cancer och astma [10]. Ett ytterligare problem med bomullsodling är att det kräver stora odlingsytor [5]. Samtidigt medför bomullsproduktion inkomsten för mer än 250 miljoner människor [11]. Därför är det viktigt att ha i åtanke att många människor är beroende av bomullsproduktionen för att få sin inkomst. Att helt sluta producera bomull och gå över till återvunna material kan därför ha negativa etiska konsekvenser som behöver förebyggas vid en omställning.

Av syntetiska material såsom polyester, polyamid och elastan tillverkas 82% av fossil råolja, vilket är problematiskt ur miljösynpunkt [5]. Förutom detta så är processen för att framställa syntetfiber energikrävande och det används ämnen som kan vara skadliga

för människor och miljö [8].

Konstgjorda fibrer från cellulosa är en annan grupp fibrer som utgör ungefär 6,4% av den totala fiberproduktionen. Det produceras ungefär 7,1 miljoner ton av dessa så kallade MMCFs (Man made cellulosic fibres) årligen. I denna grupp är viskos det absolut vanligaste och utgör ungefär 79 % av all MMCF [1]. Viskos produceras genom att extrahera cellulosa från trä. Processen för att framställa viskos kräver stora mängder energi, vatten och kemikalier. Bland annat krävs användande av lösningsmedlet koldisulfid som är mycket toxiskt och kan ge skador då det sprids i både vatten och luft [2].

3.2 Transport

Transport av textilier i produktionsledet ansvarar för ungefär 1% av en textils totala klimatpåverkan [5]. Varje produktionssteg utförs ofta i olika länder där utvecklingsländer är dominerade på grund av deras låga arbetskostnader [3]. En stor del av textilierna transporteras med båt. För att spara tid, främst för internethandel, sker en omställning mot flygfrakt. Om endast 1% av all textiltransport ändras från båt till flyg skulle detta kunna medföra 35% högre koldioxidutsläpp från transporter [3].

3.3 Användarfas

Själva användarfasen, inklusive tvätt av textilierna, har en relativt liten miljöpåverkan. Det utgör endast 3 % av den totala påverkan från textiliernas livscykel [4]. Däremot bidrar tvätt av syntetfibrer till att en halv miljon ton mikroplaster hamnar i haven varje år [2]. Ytterligare forskning krävs dock på området för att avgöra effekterna av mikroplaster [4].

På grund av användarfasens låga miljöpåverkan är det av stor vikt att förlänga den för textilier. Om varje klädesplagg används dubbelt så många gånger innan det slängs så minskar koldioxidavtrycket med 49% [12]. Enligt I2 så är en viktig del för svenska textilföretag därför att göra textilier av tillräckligt bra kvalitet för att de ska hålla länge, alternativt göra dem enkla att laga (Intervju I2 2021-02-18). Trots detta så uppskattas det att 59% av textilavfallet i Sverige är i sådant skick att det skulle gå att använda igen [13, 14].

3.4 Avfallshantering

Även slängda textilier kan leda till problem. I USA står textilavfall för över 7% av allt material som kommer till soptippar för deponi [15]. Mängden textilavfall som behöver hanteras ökar, där det mesta hamnar på deponi [15]. Textilier som läggs på deponi innebär inte bara ett linjärt system där avfallet saknar användningsområde. Kemikalier som finns i kläderna samt kvarvarande pesticider från produktionen riskerar att läcka ut och hamna i grundvattnet. Anaerob nedbrytning av naturliga textilier, såsom bomull och ull, som ligger på deponi ger även utsläpp av växthusgasen metan [16].

I Sverige går dock en stor del av textilavfallet idag till energiåtervinning [5]. Energiåtervinning gör att energi kan fås ut från materialet genom förbränning, vilket dock leder till koldioxidutsläpp [12]. Studier tyder på att återanvändning av kläder och material eller återvinning genom upcycling, det vill säga återvinning där kvaliteten eller värdet på materialet ökar, kan ge större fördelar än energiåtervinning [17].

3.5 Omställningar för en cirkulär textilindustri

Textilindustrin är i nuläget i princip helt linjär i och med att stora mängder icke-förnybara råvaror används och en stor del av avfallet går till deponi eller förbränning. Detta linjära system innebär, förutom en negativ miljö- och samhällspåverkan, att ekonomiska möjligheter inte utnyttjas. Som hanteringen ser ut idag så används mindre än 1% av använda klädtextilier till att producera nya kläder. Detta innebär en förlust av material värda mer än 100 miljarder USD per år [2].

En lösning på problemet med dagens linjära system är att ställa om till en cirkulär ekonomi där avfall inte uppstår. Resurserna behålls antingen i kretsloppet eller återförs på ett hållbart sätt till naturen; denna princip kallas för vagga till vagga. Cirkulär ekonomi innebär även att användningen av resurser ska ske på ett effektivare sätt, vilket kan leda till sänkta kostnader [18]. Andra områden såsom glas, metall och plast har redan nått betydligt längre i omställningen mot cirkulär ekonomi jämfört med textilindustrin [4]. Omställningen är dock på gång. 2015 presenterade EU-kommissionen ett förslag till åtgärder för omställningen, som innebär att EU-länderna till år 2025 ska ha metoder för insamling, sortering och återvinning av textilier. Även andra länder utanför EU, exempelvis Japan och Kina, arbetar med dessa frågor [18].

Textilier är därför en av sex prioriterade strömmar för Sveriges omställning till en cirkulär

ekonomi, men även en biobaserad ekonomi [5]. Med biobaserad ekonomi menas att biomassa produceras och utnyttjas på ett långsiktigt sätt, samt att metoderna för att förädla biomassa ska vara effektiva och miljöanpassade [19]. En del i utvecklingen mot cirkulär och biobaserad ekonomi är att skapa hållbara återvinningsprocesser. Dock är inte återvinning hela lösningen. Vid fiberåtervinning minskar utsläppen av CO_2 -ekvivalenter per kg textil med 0,5-3 kg jämfört med energiåtervinning. Totalt sett är detta en liten vinst då hela produktionen av en textilprodukt leder till utsläpp på 10-40 kg CO_2 -ekvivalenter per kg produkt [5]. Därav, menar I3, att det är viktigt att genomströmningen i det cirkulära systemet sker långsamt. Användarfasen bör vara lång, i och med att det är den fas som kräver minst energi jämfört med återvinnings- och produktionsfasen. För den del textilier som inte längre går att använda krävs effektiva återvinningsprocesser (Intervju I3 2021-04-27).

4 Lagstiftning och Styrning

4.1 FN:s Globala mål

Att ta fram bättre metoder för textilåtervinning är en viktig del för att nå de globala målen till 2030 [20]. Exempelvis är detta av relevans för mål 12 om hållbar konsumtion och produktion, i synnerhet 12.5 som handlar om att minska mängden avfall markant, exempelvis genom återvinning. Mål 3.9 kring att minska antalet sjukdoms- och dödsfall till följd av skadliga kemikalier och föroreningar är ett annat mål som relaterar till detta projekt, då processerna för att framställa nya syntetfiber och bomullsfiber kräver mycket skadliga kemikalier. Mål 13 är även av relevans, framförallt genom mål 13.2 kring att integrera åtgärder mot klimatförändringar i politik och planering. Detta kopplar till det beslut som införts kring insamling av textilier, samt det producentansvar som kan komma att införas i Sverige.

4.2 Producentansvar

Sverige vill vara ett föredöme gällande att uppnå de globala målen till 2030. Med denna bakgrund ska producentansvar för textilier införas i Sverige, vilket går i linje med EU:s direktiv om att samtliga medlemsstater ska samla in textilier separat senast 2025. Det finns två huvudsakliga syften med producentansvar. Det ena är att kunna säkerställa att textilier samlas in separat för återanvändning och återvinning. Det andra är att producenter är skyldiga att ansvara för avfallshantering och återvinning av textil utifrån principen om att förorenaren betalar. Liknande producentansvar finns redan i Sverige för exempelvis förpackningar, läkemedel, batterier och glödlampor. Dock skiljer sig utformningen för ansvaret mellan produkterna.

Med producentansvar för textilier är målsättningen att mängden textilavfall varje person årligen slänger i restavfall eller i fraktionen energiåtervinning på återvinningscentral minskar med 90% till 2036 [5]. Med denna målsättning kommer en betydligt större volym kläder samlas in, vilket enligt I2 kan vara en drivkraft för att skapa återvinningsprocesser (Intervju I2 2021-02-18).

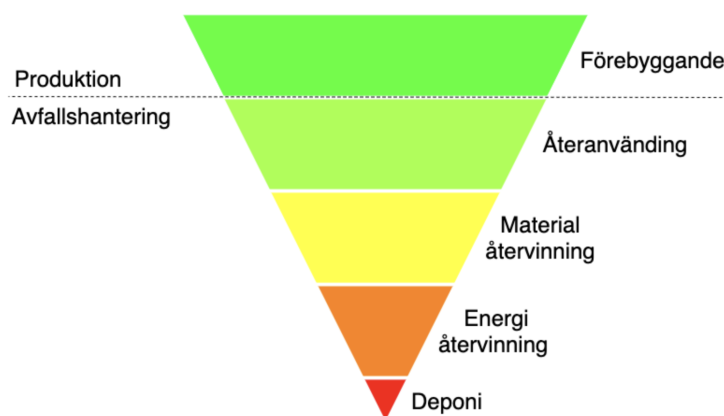
De ekonomiska följderna av producentansvar förväntas vara relativt små på konsumentpriset på kläder. Utredningen indikerar att det kommer leda till en prishöjning på 23 öre för en t-shirt [5]. Branschen anser dock att kostnaden är högre, kanske bortåt 10 kronor. I2 menar att den huvudsakliga målsättningen med producentansvar inte är att

öka priserna på kläder och därmed försöka sänka konsumtionen, utan det viktiga är att konsumtionsmönstret förändras och avfallet minskar och samlas in. I2 menar snarare att en hög prisökning på svenska kläder kan ha negativa konsekvenser. Det kan leda till att fler konsumenter istället vänder sig till billigare klädesföretag utomlands. Denna ökade import av varor kan leda till mindre pengar i cirkulation i det svenska systemet och att produkter som exempelvis inte uppfyller våra kemikaliekrav kommer in i omloppet (Intervju I2 2021-02-18).

I4 lyfter fram ett problem med insamlingen av textilier som införandet av producentansvar skulle leda till. Arbetskläder används i miljöer med en rad olika kemikalier såsom betong och målarfärg, vilket i dagsläget inte återvinningsprocesserna kan hantera. Kläderna är då i slutet av sin livstid kontaminerade med diverse toxiska kemikalier från dess arbetsmiljö. Samtidigt består arbetskläder av komplext ihopsatta material- och fibermixer, därför är det inte lämpligt att återvinna med dagens tekniker. Producentansvaret gör att dessa typer av textilier samlas in för återvinning trots att storskalig återvinning inte är möjlig i dagsläget. Detta ger en begränsad allmännytta jämfört med om avfallet skulle förbrännas (Intervju I4 2021-03-04).

5 Textilavfallshantering idag

År 2008 införde EU ramdirektivet för avfall i vilket hierarkin av avfall även skapades [21]. Meningen med hierarkin är att skapa tydliga prioriteringar för avfall som ett verktyg för att gå mot en mer hållbar industri. Avfallshierarkin kan ses i figur 5.1. Det första steget är förebyggande, alltså se till att inget avfall skapas från första början. Alla fallande steg under detta berör redan skapat avfall och i vilken ordning de olika avfallshanteringarna bör prioriteras för att vara så resurseffektiva som möjligt. Det näst bästa alternativet är således återanvändning vilket i fallet av textilier kan vara att plagget säljs second-hand. Det tredje steget är materialåtervinning. För kläder kan det utföras genom kemisk, mekanisk och termisk återvinning. Det fjärde steget är energiåtervinning, vilket är det som huvudsakligen görs i Sverige. Det går ut på att materialet förbränns och den frigjorda värmeenergin tas vara på. Det femte och slutgiltiga steget är deponi, det sämsta alternativet. Vid avfallshantering av textilier bör därmed i den mån det är möjligt följa hierarkin och inte använda lägre steg än vad som behövs.



Figur 5.1: Avfallshierarkin

De tre första stegen i avfallshierarkin för fallet av textilier undersöks närmare i nedanstående kapitel.

5.1 Förebyggande åtgärder

Enligt EU:s avfallstrappa är förebyggande åtgärder det mest fördelaktiga ur miljösynpunkt. Ett exempel på företag som arbetar starkt med kvalitén på deras kläder och på så sätt har möjlighet att förlänga livslängden är Blåkläder. I4 berättar att Blåkläders kundkrets skiljer sig från de mer konventionella modeföretagen då deras kunder använder kläderna tills att de är obrukbara. Av denna anledning anser Blåkläder att

det mest miljöeffektiva de kan göra är att använda blandade material i sina produkter för att på så sätt se till att förlänga livslängden (Intervju I4 2021-03-04). För de företag som inte har denna unika kundkrets, som istället använder sig av den tidigare nämnda affärsmodellen Fast Fashion, finns det inte samma anledning att öka livslängden på produkterna. Dessa kunder använder inte plaggen tills att de är obrukbara, vilket inte gör det försvarbart att ha en lika lång livslängd som tidigare nämnda arbetskläder. Sådana företag bör prioritera sina resurser på andra delar av avfallshierarkin. Det hade varit bäst om konsumenter använde sina kläder tills dess att de är obrukbara för att minska konsumtionen av nya kläder, men detta är troligtvis inte möjligt med dagens konsumtionsmönster.

5.2 Återanvändning

Textilier som har en tillräckligt bra kvalitet för att användas bör optimalt sett aldrig användas för något annat än återanvändning [4]. Återanvändning innebär en förlängd livslängd för textilierna, vilket är fördelaktigt oavsett om återanvändningen sker i Sverige eller i andra länder. Den informationen är viktig eftersom svenskar årligen skänker 3.8 kg textil samtidigt som svenskar i genomsnitt köper 0.8 kg begagnad textil. Det gör att en stor mängd textilier exporteras från Sverige. Från Norden exporteras årligen ungefär 75 000 ton. Studier visar att den uteblivna produktionen till följd av exporten ger en besparing på 193 000 ton koldioxid-ekvivalenter och 72 miljoner kubikmeter vatten [5].

I1 berättar att av de textilier som skänks till Röda Korset i Sverige så säljs ungefär 40% i deras egna butiker. De övriga 60% säljs till stora textilåtervinningsmottagare, exempelvis Texaid och I:CO i Tyskland. Röda korset arbetar med att så mycket som möjligt ska kunna återanvändas i Sverige, medan andra aktörer som samlar in textilier skickar vidare allt till textilåtervinningsmottagare. Dessa mottagare säljer sedan vidare det de kan vilket är ungefär 60% av de textilier de får in. I första hand säljs det vidare i Tyskland, i andra hand i Östeuropa och i tredje hand i utvecklingsländer. Det som inte kan säljas vidare och har absorptionsförmåga, ungefär 15%, klipps ner och blir putstrasor till industrin. Kan textilierna malas ner kan de även bli isolering, vilket utgör ungefär 15%. De återstående 10% av textilierna som det inte går att göra något med, exempelvis flamskyddsbehandlat material, förbränns (Intervju I1 2021-02-11).

I1 menar fortsatt att textiliernas låga värde idag gör att enorma återvinningsanläggningar behövs och att lite pengar tjänas på återvunna textilier. Det leder till att väldigt lite tid

kan läggas på att hantera de återvunna textilierna innan det blir en förlustaffär. Det syns även att det stora utbudet tillsammans med en efterfrågan som är lägre än utbudet av begagnade textilier gör att allt mer förbränns. I1 menar att om återvinningsprocesserna förbättras är förhoppningen att de textilier som i framtiden skänks till Röda Korset är av bättre kvalitet och därmed kan säljas i deras second hand-butiker. Det leder till att resurser frigörs till annat (Intervju I1 2021-02-11).

Det finns farhågor kring att second hand-marknaden kommer bli mättad om insamlingsvolymerna ökar. Det förutspås att när antalet medelinkomsttagare ökar globalt kommer efterfrågan på nyproducerade produkter att öka. Samtidigt har många länder i Afrika förbjudit import av second hand-textilier för att gynna den lokala marknaden. Därför är det inte rimligt att fortsätta konsumera nyproducerat i den mängd västvärlden idag gör och därefter anta att andra ska återanvända textilierna [5].

5.3 Materialåtervinning

Metoder för materialåtervinning av textilier brukar grovt delas in i kemiska, mekaniska och termiska metoder. Kemiska och mekaniska metoder beskrivs i nedanstående kapitel och termokemisk återvinning undersöks i kapitel 6.

5.3.1 Mekanisk återvinning

Mekanisk återvinning innebär att materialet mekaniskt görs om till nya produkter, oftast genom en rivningsprocess. Mekaniska återvinningsprocesser kan delas upp i två huvudgrupper: termomekaniska och mekaniska processer. Termomekanisk återvinning sker genom att ett syntetiskt tyg, ofta polyester eller nylon, smälts ner till granulat som sedan kan spinnas till ny tråd. Denna process klarar bara rena material som kan smältas och är väldigt känslig mot föroreningar [16]. De mekaniska processerna å andra sidan går ut på att skära ner tyget till mindre bitar som sedan kan användas till exempelvis trasor eller isolering. I denna process kan även blandade tyger användas så länge fibrerna är av liknande styrka. Då syntetiska fiber ofta är starkare än organiska kan en blandning av dessa därmed inte användas [22].

Enligt I3 så är fördelen med den mekaniska återvinningen att liten mängd kemikalier och vatten krävs. Processen är även relativt effektiv, och varje komponent behöver inte behandlas som det görs i kemisk återvinning (Intervju I3 2021-03-03). Slitaget under textiliernas användning och den mekaniska processen gör dock att fibrerna får sämre

kvalité, och de resulterande produkterna har ofta lägre värde än ursprungsprodukterna, så kallat downcycling. Vid produktion av textilier från mekanisk återvinning behövs därför de återvunna fibrerna blandas med nya för att ge tyget bättre kvalité. I3 menar därmed att det endast delvis löser problematiken kring nyproduktion (Intervju I3 2021-04-27).

5.3.2 Kemisk återvinning

Kemisk återvinning innebär att textilfibrerna antingen löses upp eller depolymeriseras. Genom kemisk återvinning kan alltså fibrer separeras och byggas upp igen med samma kvalité som ursprungsfibrerna. Denna typ av återvinningsmetod används dock inte i särskilt stor skala då det finns många svårigheter med metoden. Enligt I3 är den stora utmaningen med kemisk återvinning att värdekedjan idag inte är transparent. En heterogen massa material fås in till återvinning med olika färgmedel och additiv, vilka bryts ner i den kemiska processen och ska därefter ansvaras för i produkten eller i processens restströmmar (Intervju I3 2021-03-03).

Idag finns ett antal olika kemiska återvinningsprocesser på marknaden som kan återvinna olika sorters fibrer. Gemensamt för dessa processer är att de endast lämpar sig för en slags fiber [5]. Om kemisk återvinning ska tillämpas på textilier med blandade fibrer måste fibrerna separeras först. För textilier gjorda av bomull har företaget Renewcell utvecklat en kemisk återvinningsprocess. Processen går ut på att cellulosan i bomullet kemiskt bryts ner till en dissolvingmassa. Dissolvingmassan kan sedan användas till att tillverka nya textilfibrer av viskos och lyocell [5]. Kvaliteten på fibrerna minskar för varje cirkulering eftersom cellulosan bryts ner vid användning, tvätt och återvinning. Därför kan cellulosa-baserade fibrer endast återvinnas ett fåtal gånger innan de går till etanoltillverkning eller energiåtervinning [6].

Kemisk återvinning av polyesterfibrer är något som företaget Teijin Fibers har utvecklat en teknik för. Sedan tidigare finns andra tekniker för återvinning av polyester, men Teijin Fibers process är den första som återvinner polyester från tyg kemiskt. Tekniken, som Teijin Fibers kallar för Eco-Circle, bryter ner polyestermaterial till polyester-råvaror som har samma renhet som ny polyester skapad av petroleum. Denna process används däremot inte i någon större utsträckning. Majoriteten av den polyester som benämns som återvunnen är därmed inte gjord av tidigare polyestertyg utan vanligare av återvunna PET-flaskor [23].

Fibrer av polyamid, även känt som nylon, kan också återvinnas kemiskt. Detta sker

genom depolymerisering av fibrerna, där målet är att få kemikalierna caprolactam och hexametylendiamin, eftersom dessa kan användas till att syntetisera nya polyamidfibrer [24]. Detta är något som företaget Aquafil har utvecklat en process för [25]. Processen kallas för Econyl och kan återvinna nylon till samma kvalitet som nyproducerat nylon. Ett viktigt forskningsområde för Aquafil är att studera hur blandmaterial som består av nylon tillsammans med andra komponenter kan återvinnas [26].

Med kemisk återvinning är det även möjligt att återvinna så kallade polycottontextilier, alltså blandningar av polyester och bomull. 2017 utvecklade ett svenskt forskarteam processen Blend Re:wind för att separera bomullsfibrer från polyesterfibrer, vilket gör att polycotton textilier kan återvinnas [5]. I3 var en del av teamet och berättar att det generellt sett i Europa och USA är mycket fokus på återvinning av bomull samt polycotton-blandningar (Intervju I3 2021-03-03).

För att kunna återvinna syntetiska blandningar med kemisk återvinning måste ett sätt att separera de olika fibrerna hittas, annars bör en annan återvinningmetod användas. Klädföretaget Houdini ligger i framkant vad gäller återvinning av textilier och samarbetar med tidigare nämnda Teijin Fibers. I designen av kläder beskriver Houdini att de i den mån de kan undviker användandet av stretchfibrer, exempelvis elastan, eftersom de i nuläget omöjliggör cirkularitet [27]. Fortsatt har Houdini som mål att försöka återvinna polyamid i stor skala, alternativt byta ut polyamid i sin textilproduktion eftersom fibrern är en av de värsta ur klimat-förändringsperspektiv [28]. Både energiåtgången och koldioxidutsläppen är högre för polyamid jämfört med övriga fibrer [3]. Det finns därför ett stort behov för återvinningstekniker för material med elastan och nylon.

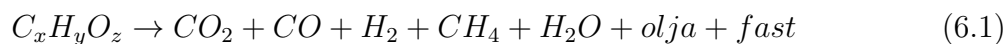
6 Termokemisk återvinning

En metod för att återvinna polymerer är olika termokemiska metoder, t.ex pyrolys och förgasning. Gemensamt för dessa metoder är att de med hjälp av höga temperaturer bryter ner polymerer till dess baskemikalier [29].

6.1 Beskrivning av termokemisk återvinning

I både pyrolys och förgasning fås en produkt som består av tre delar. En fast del, som utgörs av aska och koks, en flytande del och en del i gasfas. Skillnaden mellan processerna är att förgasningen utförs i högre temperaturer samt att pyrolysisprocessen sker utan tillförsel av syre. Inom pyrolys är det främst den flytande delen, oftast kallad pyrolysolja, som efterfrågas. Denna olja kan användas både som bränsle och för att tillverka olika baskemikalier inom kemiindustrin. Vid högre temperaturer bryts polymerer ner till mindre molekyler än vid lägre temperaturer där det istället bildas större molekyler och fler olika föreningar. I förgasningsprocessen är det istället gasfasen som är den önskvärda produkten då den till stor del består av syngas [30, 31]. Den bildade gasen har två huvudsakliga användningsområden, som bränsle via förbränning och användning i kemiska processer. I förbränningssyfte är en låg andel koldioxid önskvärt eftersom den inte kan förbrännas. En större mängd koldioxid innebär också en högre kostnad då denna behövs separeras bort för att få en önskvärd sammansättning till olika processer. Om koldioxiden separeras ut kan den användas för att tillverka metanol som sedan kan användas i vidare reaktioner, däremot kräver denna process mycket energi samt stora mängder vätgas [32].

Översiktligt kan pyrolys- och förgasningsprocesserna sammanfattas till följande reaktion:



Då det laborativa arbetets syfte var att tillhandahålla användbara baskemikalier, vilka återfinns i oljan, valdes pyrolys som den termokemiska metoden att undersöka. Detta för att maximera andelen pyrolysolja. För att bevara så mycket som möjligt av molekylernas komplexitet valdes en relativt låg temperatur på reaktorn, 500°C. Som tidigare nämnt finns det ett stort behov för återvinningmetoder för blandningar av polyester, nylon och elastan. Därför har pyrolys av dessa material vidare undersökts.

Skulle textilier återvinnas termokemiskt är det inte garanterat att de baskemikalier som

de bryts ner till kan användas för tillverkning av nya textilier. I3 berättar även att vägen tillbaka till nya polymerer är ganska lång efter termokemisk återvinning (Intervju I3 2021-03-03). Enligt I3 är det viktigt att ha i åtanke att de produkter som fås ut från återvinningsprocesser ska ersätta jungfrulig råvara och ha en funktion (Intervju I3 2021-04-27). Anledningen till att det är stort fokus på textil till textil är att framtida direktiv dels uppger att produkter ska vara återvinningsbara samt att återvunnen, förnyelsebar eller biobaserad råvara ska nyttjas. Många företag vill därför ha in återvunnen råvara till sin textilproduktion (Intervju I3 2021-03-03). Enligt I2 på TEKNO så är dock det viktigaste att något görs med de använda textilierna, det är inte bara ersättning av textilfibrer som är av intresse (Intervju I2 2021-02-18).

I3 menar att termokemisk återvinning är en bra lösning i dagsläget när värdekedjan inte är transparent. Metoden är inte speciellt känslig eftersom även skadliga kemikalier bryts ner. Enligt I3 är det även svårt att veta hur framtiden ser ut för olika material. Då är det viktigt att arbeta på ett sätt så återvinningsprocessen kan anpassas efter marknadsläget, varav den termokemiska återvinningen är attraktiv om den smidigt går att justera efter marknaden (Intervju I3 2021-03-03).

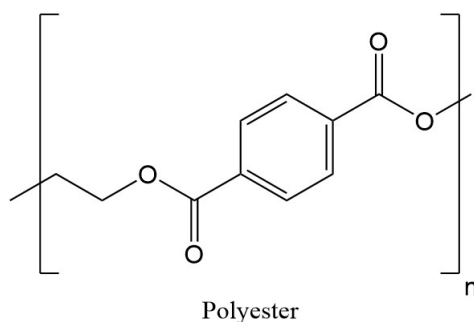
Ännu en möjlig fördel med termokemisk återvinning är att den troligen kan integreras med befintlig teknik, berättar I3. Det gör förmodligen att kostnaden för termokemisk återvinning blir lägre. Generellt finns det dock relativt få beräkningar gjorda på kostnaden för materialåtervinning (Intervju I3 2021-04-27).

6.2 Tidigare experiment

I följande stycken sammanfattas resultatet av tidigare studier gjorda på pyrolys av polyester, nylon och elastan. Detta för att kunna jämföras med det laborativa resultatet och ge mer data för analys.

6.2.1 Polyester

Polyester är en typ av polymer som innehåller estergrupper i sin struktur och kan se ut på olika sätt beroende på vilka monomerer den är uppbyggd av. I figur 6.1 visas monomeren som bygger upp polyestern PET, vilket är den dominerande sortens polyester i textilindustrin [33].



Figur 6.1: Monomeren i PET, en typ av polyester

En studie på pyrolys av ren PET i en fluidiserad bädd reaktor har gjorts av Yoshioka et al. [34]. I studien användes en reaktor med en diameter på 154 mm och två olika temperaturer, 510°C och 630°C, användes vid pyrolysen av ren PET. Produkterna som erhöles efter pyrolysen är sammanställda i tabell 6.1.

Tabell 6.1: Sammanställning av de huvudsakliga produkterna från pyrolys på ren PET vid två temperaturer enligt [34]

Ämne	510°C [vikt%]	630°C [vikt%]
Gaser	39	38
CO_2	13	17
CO	23	18
H_2	0.09	0.13
CH_4	0.87	1.9
$C_2 - C_4$ kolväten	2.6	1.33
Olja	50	37
Bensen och benserivat	1.29	2.36
Aldehyder och ketoner	2.6	3.6
Estrar, lactoner, anhydrider	0.2	0.12
Bensoesyra	21	16
Övriga O-innehållande komponenter	0.29	0.35
NaOH-lösliga komponenter	24	13
Vatten	0.09	0.13
Ej identifierade	0.23	0.21
Ej detekterade	7.3	12
Fasta organiska ämnen	5.2	13

Från resultatet i tabell 6.1 framgår att den lägre temperaturen gav en större mängd pyrolysolja och en lägre andel ej detekterade komponenter samt fasta organiska ämnen. Mängden gas var nästan lika vid de två experimenten, 39 och 38 vikt% för 510°C respektive 630°C. Pyrolysoljan består av en stor mängd olika komponenter och bensoesyra är det ämne som förekommer i störst mängd, 21 och 16 vikt% för 510°C respektive 630°C.

Pyrolys av polyester vid en temperatur på 768°C har studerats i en fluidiserad bädd reaktor i laboratorieskala av Kaminsky et.al [35]. En sammanställning av resultatet från studien visas i tabell 6.2.

Tabell 6.2: Sammanställning av de huvudsakliga produkterna från pyrolys på polyester vid 768°C enligt [35]

Ämne	vikt%
Gaser	50.2
CO_2	26.9
CO	17.4
H_2	0.3
Metan	3.8
$C_2 - C_4$ kolväten	0.5
Olja	42.7
Bensen	18.1
Toluen	2.7
Naftalen	2.6
Metylnaftalen	3.0
Övriga aromatiska föreningar	8.5
Sot	7.1

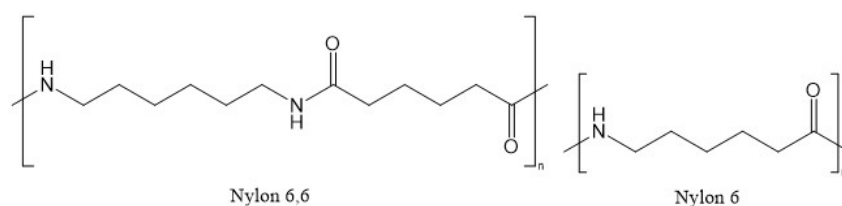
Studien visade således att pyrolysen resulterade i ca 50 vikt% gaser, 43 vikt% olja och resten sot. Oljan utgjordes främst av olika aromatiska föreningar, där bensen förekom i störst mängd.

6.2.2 Nylon

Nylon är ett samlingsnamn för fibrer av polyamid, alltså polymerer med amidgrupper. De vanligaste typerna av nylon är nylon 6 och nylon 6,6. Även om nylon 6 och nylon 6,6 är väldigt lika, se Figur 6.2, erhöles det vid pyrolys ganska olika ämnen. I en studie där tunna filmer av nylon 6 pyrolyserades i en pyrolys-GC vid 350-500°C tillhandahölls nästan enbart kaprolaktam, dess monomer [36]. Filmerna gjordes så tunna att den önskade temperaturen nåddes på millisekunder och att inga sekundära reaktioner kunde ske. Kaprolaktam kan användas för att på nytt skapa nylon 6 vilket ger den ett högt ekonomiskt värde [37]. Att bryta ner nylon 6 till kaprolaktam och använda denna vid nyproduktion istället för ljugfrulig råvara har även en positiv klimatpåverkan.

Vid pyrolys av nylon 6,6 bildas det vid 480°C framför allt cyklopentanon, från molekylen syre del, och hexametylendiamin, dess andra del som inte bryts ner något längre [38]. Vid 620°C bryts dessa ner ytterligare och utöver tidigare nämnda ämnen fås även gaser med

låg kokpunkt samt lite av bensen, akrylnitril, acetonitril, pyridin, styren och pyrrol [38]. Resultat från en studie på pyrolys av nylon 6,6 vid olika temperaturer kan ses i Tabell 6.3.



Figur 6.2: Monomeren i nylon 6,6 respektive 6

Tabell 6.3: De huvudsakliga produkterna vid pyrolys av nylon 6,6 vid två temperaturer enligt [39]

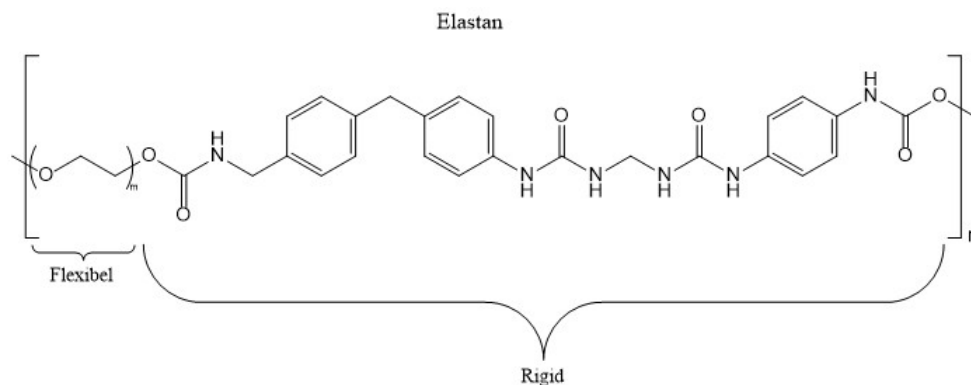
Ämne	510°C [vikt%]	630°C [vikt%]
CO ₂	1.09	2.90
CO	0.54	4.53
Metan	0.4	6.43
Etan	0.89	7.75
Vätecyanid	0.01	0.04
Summa gaser	4.19	30.27
Alifatiska kolväten	1.04	1.81
Bensen	0.17	8.16
Toluen	0.13	3.74
Propanitril	0.09	0.68
Bensonitril	0.01	0.43
Summa aromater	0.4	15.83
Andra N-innehållande komponenter	0.94	3.7
Andra olje komponenter	38.87	11.37
Olja med hög kokpunkt	50.77	24.69
Ammoniumsalt	-	0.32
Sot	3.15	1.66

Som kan ses från tabellen blev nästan hela produktflödet, 89%, till olja vid 510°C. Vid 630°C däremot blev betydligt mer till gas och aromater och således erhöles mindre än hälften så mycket olja jämfört med resultaten vid 510°C.

I Applied Pyrolysis Handbook finns kromatogram från pyrolys av både nylon 6 och 6,6 vid 550°C. Från detta drogs slutsatsen att vid upphettning av polylactamer med korta kolkedjor, som t.ex nylon 6, återfås oftast dess laktam monomer [40]. För nylon 6,6 däremot erhöles till största del cyklopentanone samt en del alkener och alkaner[40].

6.2.3 Elastan

Elastan är en typ av polyeter-polyuretan copolymer som har flera olika namn, bl.a span-dex och lycra. Elastan kan även ha flera olika strukturer beroende på tillverkare[41]. Generellt består molekylerna av en rigid polyuretan del och en rörlig och flexibel polyeter del. Ett exempel på hur detta hade kunnat se ut kan ses i figur 6.3.



Figur 6.3: Elastan

Inga tidigare studier på pyrolys av elastan i textilier har hittats men i två studier av W. Kaminsky har pyrolys av ren polyuretan utförts vid 760 respektive 750 °C. Båda experimenten utfördes i en fluidiserad bädd av kvartssand där reaktorn hade en innerdiameter på 450 respektive 154 mm. I tabell 6.4 ses fördelningen av faserna i de två studierna. Även om sammansättningarna i de två studierna var annorlunda så innehöll de olika faserna liknande komponenter. Gasen som erhöles bestod främst av koldioxid, kolmonoxid, metan och eten. Oljefractionen innehöll främst bensen, toluene, naphthalene, nitriler, ketoner och indene [42, 43].

Tabell 6.4: Komponenter vid pyrolys av polyuretan

Komponent	760 °C [vikt%]	750 °C [vikt%]
Gas	37,9	53
Olja	56,3	19,8
Tjära	0,5	27,2
HCN	0,3	0,5 (inkl. i gas)
Vatten	5	

7 Laborativ metod

7.1 Pyrolys

Pyrolysen utfördes i en fluidiserad bädd-reaktor i laborativ skala med en höjd på 1.27 m och en inre diameter på 79 mm. I figur 7.1 visas en bild på reaktorn. I botten av reaktorn finns en platta med hål genom vilken förgasningsmedlet, som i detta fall var kvävgas, strömmar upp genom för att få en jämnt fluidiserad bädd. Bädden bestod av 500 gram olivin. I botten tillsattes även heliumgas som användes som spårämne vid analys av gasprover. I toppen av reaktorn tillsattes textilprovet i form av komprimerade tygpellets. Ett prov genomfördes även med granulat av ren PET för att kunna jämföra det rena ämnet med det blandade.



Figur 7.1: Fluidiserad bädd-reaktor

Pelletsen tillverkades av två olika tyger bestående av 92% polyester och 8% elastan respektive 90% polyamid och 10% elastan. Tygerna klipptes ner i mindre bitar för att sedan komprimeras till pellets. Tre olika typer av pellets tillverkades: en av tyget med polyester/elastan, en av tyget med polyamid/elastan och en som var en blandning av dessa två. Blandningen hade en sammansättning med 20% av polyamid/elastantyget och 80% av polyester/elastantyget. Detta gav en total sammansättning med ca 74% polyester, 18% polyamid och 8% elastan.

Proverna om ca. 1.5 g matades en åt gången för hand till den varma reaktorn. För att ta

gasprov injicerades en spruta i sidan av tanken genom vilken gasprov sedan pumpades ut under tre minuter från det att pelletsen matades in. Under pyrolysen var reaktorn dryga 500°C. De exakta förhållanden för varje prov redovisas i tabell 7.1. Mellan varje prov kördes ett luftflöde igenom reaktorn för att bränna bort alla oljerester som kan ha skapats. För två prover av varje sort samlades denna luft upp med ny gaspåse och spruta. Provet togs under två minuter. Gasen gick igenom ett filter med fastfas absorption (SPA kolonn) på vilket pyrolysoljan kondenserade och absorberades. Den renade gasen samlades upp i gaspåsar.

För att testa pyrolysoljan sköljdes det fasta materialet med en lösning bestående av acetonitril, isopropanol och diklormetan med en sammansättning av 10:10:80 (ACN:IPA:DCM). Vätskan desorberade tjärorna som samlades upp. En internstandard med känd koncentration 4-etoxifenol användes.

Tabell 7.1: Genomförda prover

Prov	Innehåll	Vikt[g]	Temp.[°C]
10	100% PET	1.5	507
11	100% PET	1.5	507
13	100% PET	1.5	503
20	92% polyester, 8% elastan	1.4938	504
21	92% polyester, 8% elastan	1.5073	505
22	92% polyester, 8% elastan	1.5071	506
23	92% polyester, 8% elastan	1.5151	503
30	90% polyamid, 10% elastan	1.4810	503
31	90% polyamid, 10% elastan	1.4920	501
32	90% polyamid, 10% elastan	1.4903	502
40	74% polyester, 18% polyamid, 8% elastan	1.5031	501
41	74% polyester, 18% polyamid, 8% elastan	1.4945	502
42	74% polyester, 18% polyamid, 8% elastan	1.4893	503
43	74% polyester, 18% polyamid, 8% elastan	1.4963	504

7.2 Analys av laborativa resultat

Fyra olika typer av analyser användes för att analysera prover från experimenten i reaktorn. Mikro-gaskromatografi (μ -GC) analyserade gasformiga ämnen från reaktorn. Gaskromatografi med flamjonisationsdetektor (GC-FID) och gaskromatografi med masspektrometri (GC-MS) användes för att analysera pyrolysoljan. Termogravimetrisk analys (TGA) analyserade massförlusten baserat på temperatur.

7.2.1 μ -GC

Den uppsamlade gasen analyserades med μ -GC. För beräkningar antogs ideal gas.

Gasmängden kvantifierades med hjälp av helium som spårgas med följande ekvation.

$$n_i = \frac{V_{He} \cdot V\%_i}{V\%_{He}} \cdot \frac{P}{R \cdot T} \quad (7.1)$$

där n är gasmängd i mol, V_{He} är volym helium till reaktorn, $V\%$ är volymsprocent gas, P är tryck, R är ideala gaskonstanten och T är temperatur.

7.2.2 TGA

Proverna analyserades med TGA för att ta reda på hur mycket av provet som omvandlats vid en given temperatur. I en rapport av S. Li finns metoden och analysapparaten som användes beskriven [44]. Temperaturprofilen som användes var 50°C/s.

7.2.3 GC-MS

De förberedda proverna kunde analyseras med direktinjektion i GC-MS. Som lösningsmedel i kolonnen användes rent diklormetan. För att få en tillräckligt bra upplösning kördes proverna enligt de inställningar som anges i Bilaga 2.

För att analysera topparna användes *Agilent MassHunter Qualitative Analysis 10.0* vilket identifierade topparna utifrån *Mass spectra library: NIST20*. Alla toppar innehållande kisel och arsenik räknades bort som blödning från kolonnen. Internstandarden av 4-etoxifenol uteslöts ur resultatet. För varje topp i kromatogrammet erhöles förutom identitet på kemikalierna som toppen representerar även toppens area. Genom att dividera arean för en topp med den totala arean för alla toppar i kromatogrammet kunde ett approximativt värde fås på hur stor koncentration, i mol%, av provet som kemikalien utgör.

7.2.4 GC-FID

De förberedda proverna analyserades i GC-FID, inställd enligt Bilaga 1.

För att analysera och visualisera datan användes mjukvaran *CompassCDS* från *SCION instruments*. Denna metod kan bara identifiera ett visst antal ämnen. De ämnen som kan identifieras redovisas i Bilaga 6.

Resultaten från GC-FID kvantifierades med hjälp av internstandarden. Mängden ämne beräknades, i g/kg bränsle, med följande ekvation

$$m_i = \frac{m_{standard}}{m_{provikt}} \cdot \frac{Area_i}{Area_{standard}} \quad (7.2)$$

där m_i är massan i g/kg bränsle för det beräknade ämnet, $m_{standard}$ är massan av internstandarden, $m_{provikt}$ är massan av textilprovet i reaktorn och areorna är topparean i procent från resultatet av GC-FID.

För att undersöka hur mycket av provets massa som går till de olika produktfaserna, gas, olja och tjära, utfördes en atombalans för kol. För de olika ämnena beräknades det, utifrån strukturen och kända molmassor, hur stor del av fibern som utgörs av kol, väte, syre och kväve. Informationen användes sedan för att beräkna provernas sammansättning av dessa ämnen och hur mycket kol som varje prov innehåller.

Resultaten från μ -GC användes sedan för att beräkna hur stor del av provets kol som har hamnat i gasen. På liknande sätt kan GC-FID resultaten användas för att kvantifiera hur stor del av kolen som hamnat i de detekterbara ämnena i oljan. Sammantaget fås hur stor del av provets kol som inte hamnar i någon av tidigare nämnda delar.

8 Laborativa resultat

8.1 Sammansättning

Diagrammen som tillhandhålls ifrån TGA-analysen kan beskådas i Bilaga 3. Utifrån dessa kan det ses att vid 500°C återstod cirka 19 vikt% okonverterat material från PET, 23 vikt% för blandningen av polyester och elastan respektive 8 vikt% för blandningen av polyamid och elastan. Detta innebär att för blandningen av polyester, polyamid och elastan återstår det approximativt 20 vikt%. Det material som återstod består av okonverterat material, koks och aska. Koks är den del som finns kvar efter fullständig konversion av proven. För PET erhöles 0.46 vikt% koks, från polyester/elastan erhöles 3.35 vikt% och för nylon/elastan skapades nästan ingen koks. Andelen aska är det som återstår efter förbränning av kokset vilket blev försumbart för PET samt 0.43 vikt% respektive 0.76 vikt% för polyester/elastan och nylon/elastan. Resultaten för polyester/polyamid/elastan beräknades utifrån resultaten för polyester/elastan samt polyamid/elastan, med antagandet att mängden av varje är 80 % respektive 20 %.

Utifrån dessa resultat samt resultaten från gasprovsanalysen och GC-FID kan den totala fördelningen av gas, olja och aska från pyrolysen erhållas. De kända aromaterna är en del av den bildade oljan. Koksen och askan som bildas är en del av den okonverterade delen. Fördelningen presenteras i tabell 8.1.

Tabell 8.1: Sammansättning av prover [vikt%]

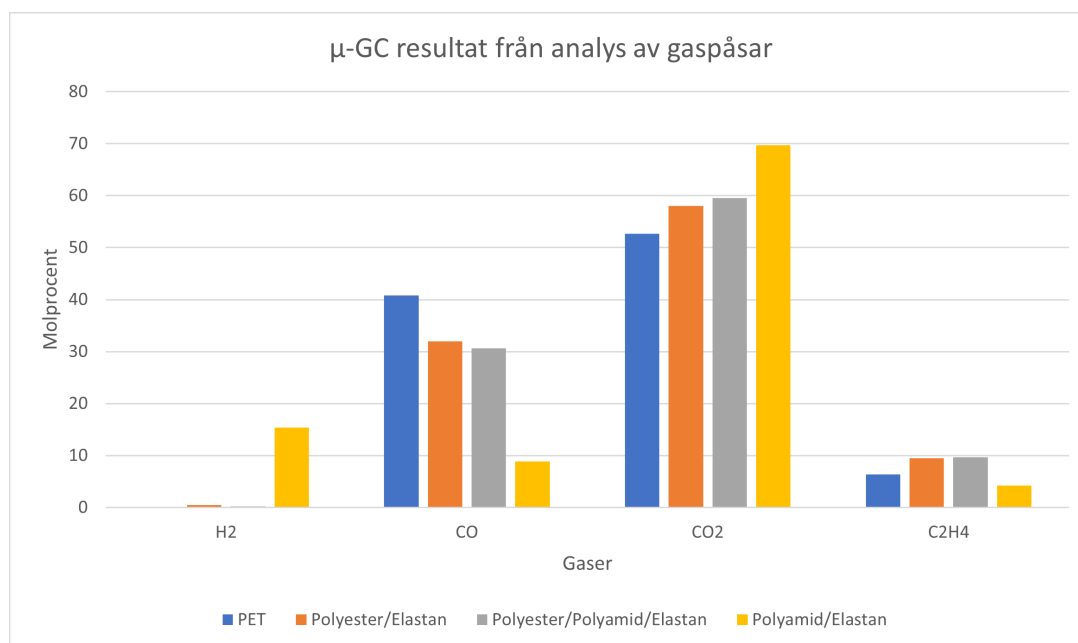
Prov	Gas	Olja	Kända aromater	Okonv.	Koks	Aska	Fukt
PET	41.9	38.97	17.9	19.11	0.46	0	0.02
PE/El	29.4	47.14	11.2	23	3.35	0.43	0.46
PA/El	12.6	77.41	2.8	8	0.01	0.76	1.89
PE/PA/El	34.7	44.56	10.9	20	2.68	0.49	0.74

8.2 μ -GC

Vid analys av gaserna kunde sammansättningen av gasen samt andelen prov som blev till gas beräknas. I tabell 8.1 redovisas andelen som blev till gas av proven.

Resultatet visar att mest gas bildades från provet med PET och minst från provet med polyamid/elastan. Dock är det viktigt att nämna att den μ -GC som användes för analysen inte detekterar alla sorters gaser och därför kan de verkliga siffrorna skilja sig något från resultatet. Det är exempelvis möjligt att det bildades lite HCN och kolväten med längre

kolvätekedjor i några av proverna som inte detekterades, men troligen var mängden av dessa gaser i sådant fall väldigt små och kan därför försummas från resultatet. Från ett av proverna med polyester/elastan samt polyester/polyamid/elastan framgick det även i resultatet att C_3H_x bildades. Eftersom det endast visades i ett par av repetitionerna och endast en väldigt liten mängd uppmättes försummas den gasen från resultatet. I figur 8.1 visas resultatet av vilka komponenter gaserna bestod av och i Bilaga 4 finns dessa värden tabellerade.



Figur 8.1: Sammansättning av gas i molprocent

Resultatet visar att gaserna som bildades till största del bestod av koldioxid. Alla proverna resulterade i mellan 52.7 mol% och 69.7 mol% koldioxid, där PET-provet gav lägst andel koldioxid och polyamid/elastan högst. För alla proverna förutom polyamid/elastan blev kolmonoxid den gasen som förekom i näst störst mängd, följt av eten. För polyamid/elastan var det däremot vätgas som utgjorde den näst största andelen, följt av kolmonoxid.

8.3 GC-FID

I tabell 8.2 presenteras resultat för mängden ämnen som detekterades och uppmättes från GC-FID analysen, i g/kg bränsle. BTXS avser bensen, toluen, xylen och styren. N Aromater och O Aromater är aromater innehållande kväve respektive syre. Övriga aromater är de som inte faller in i tidigare nämnda kategorier. Okända är ämnen som

inte kunde identifieras. Totalmängden är approximerad utifrån mängden bensen och dess topparea från GC-FID analysen.

Tabell 8.2: Ämnen detekterade i GC-FID [g/kg bränsle]

Prov	BTXS	N Aromater	O aromater	Övriga	Okända	Totalt
PET	7.2	0	162.6	9.4	43.7	222.9
Polyester/Elastan	6.7	0.9	96.9	7.0	73.3	184.9
Polyamid/Elastan	7.1	0	18.2	2.5	72.9	100.7
Polyester/Polyamid/Elastan	10.8	3.8	89.0	5.5	63.1	172.2

I tabell 8.3 visas resultatet för atombalansen för kol. De kol som är kända är de från gasen samt från de ämnen som kan ses i GC-FID. De kol som är okända inkluderar det i pyrolysoljan som inte kunde kvantifieras med FID och det okonverterade materialet.

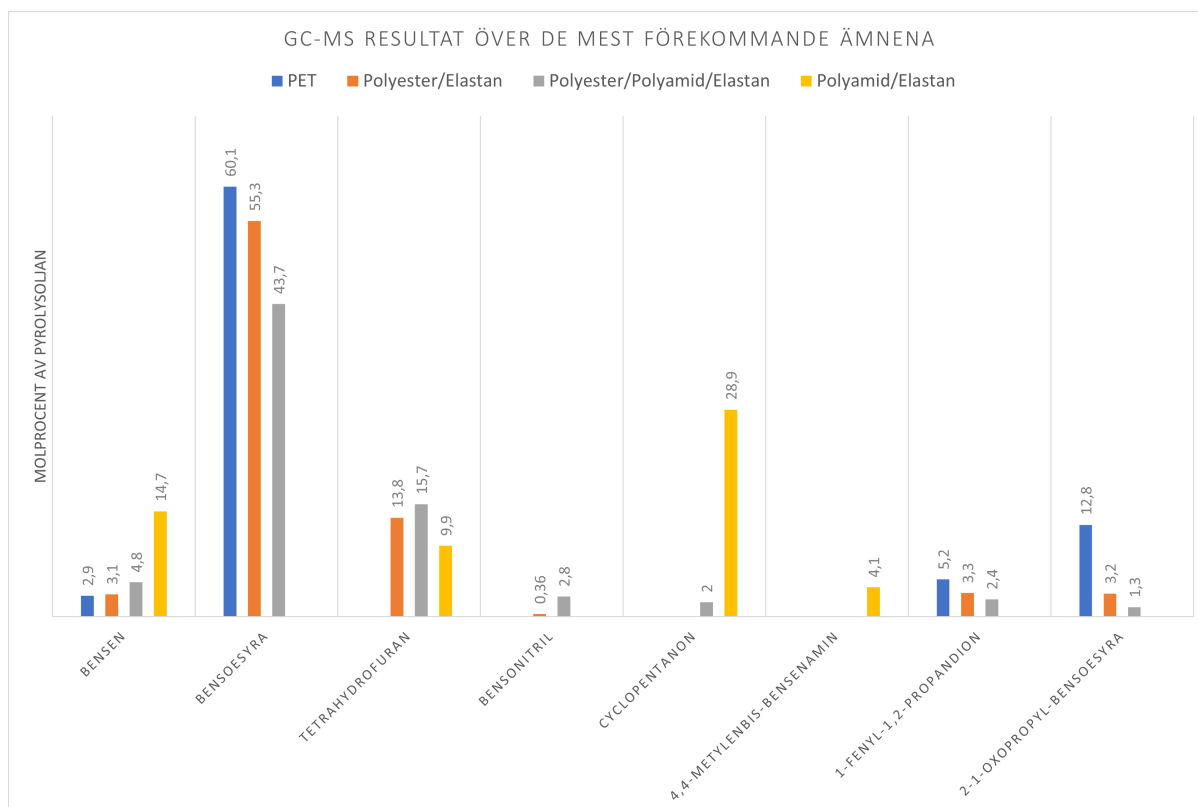
Tabell 8.3: Känd atombalans

Prov	Gas %C	Kända aromater %C	Total %C känt	Total %C okänt
PET	23.6	20.2	44	56
PE/El	16.0	13.1	29	71
PA/El	6.2	3.6	10	90
PE/PA/El	18.9	12.9	32	68

Resultatet visar att den största andelen kol för alla prover hamnade i det okända materialet. Av den kända andelen kol var det lite mer kolatomer som hamnade i gasen jämfört med kolatomer i de kända aromaterna i pyrolysoljan.

8.4 GC-MS

Analysen av pyrolysoljan i GC-MS visade att alla textilproverna hade brutits ner till en stor mängd olika kemikalier. I provet med PET detekterades ca 80 olika ämnen, i polyester/elastan 110 st, i polyamid/elastan 40 st och i polyester/polyamid/elastan detekterades 130 st. För alla prover var det dock endast ett fåtal ämnen vars kromatogramtoppar utgjorde en större andel av kromatogrammets totalarea. Som tidigare nämnt i avsnitt 7.2.3 uppskattas andelen av totalarean som ett ämnes topp utgör motsvara koncentrationen av kemikalien i mol% i pyrolysoljan. De ämnena som förekom i minst 2,7 mol% för minst ett av proverna finns redovisade i figur 8.2. I Bilaga 4 finns dessa värden tabellerade.



Figur 8.2: Resultat från GC-MS analys av pyrolysoljan

För ren PET blev den överlägset största toppen bensoesyra, som approximativt utgjorde 60 mol% av pyrolysoljan. Den näst största toppen blev 2-(1-oxopropyl)-bensoesyra. I kromatogrammet fanns ytterligare två toppar av relativt stor storlek, 1-fenyl-1,2-propandion och bensen som vardera utgjorde 3-5 mol% av pyrolysoljan. I kromatogrammet fanns även flera små toppar av bensoesyra med olika grupper tillagda.

Analysen med GC-MS av polyester- och elastanblandningen visade att den mest förekommande kemikalien var bensoesyra, med 55 mol%. Tetrahydrofuran förekom i näst störst mängd, cirka 14 mol% och ytterligare tre ämnen; bensen, 1-fenyl-1,2-propandion samt 2-(1-oxopropyl)-bensoesyra fanns i över 3 mol%.

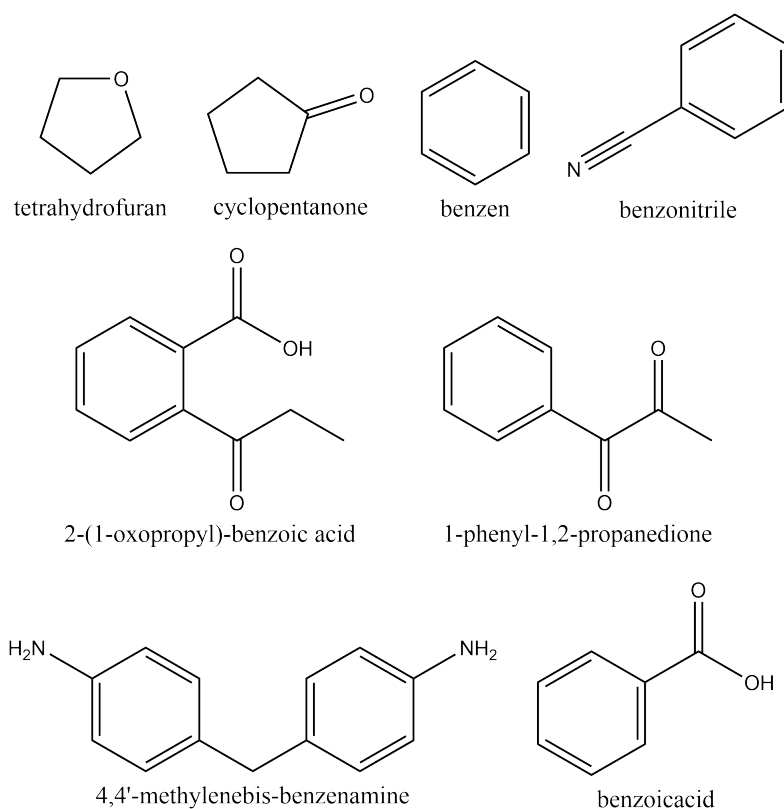
I dessa två prover fanns även nirvanol, också kallat ethylphenylhydantoin, i en betydlig mängd. Detta tros vara en förorening då denna inte anses vara en rimlig produkt och utesluts ur resultatet.

Provet från polyamid och elastan bestod till största del av cyclopentanon, bensen, tetrahydrofuran och 4,4'-methylenbis-benzenamine. Provet innehöll även en liten mängd ka-

prolaktam.

Provet från polyamid, polyester och elastan hade ca 43,7 mol% bensoesyra. Den näst största toppen var tetrahydrofuran med 15,7 mol% följt av bensen på 4,8 mol%. Kromatogrammen för samtliga prover kan ses i Bilaga 5.

Molekylstrukturen för några av de vanligaste produkterna kan ses i figur 8.3.



Figur 8.3: De vanligaste produkterna

Av produkterna i figur 8.3 så är bensoesyra, tetrahydrofuran, cyklopentanon, bensen och benzonitril viktiga baskemikalier för fortsatta reaktioner till andra kemikalier [45, 46, 47, 48]. Tetrahydrofuran, bensen och benzonitril används även som lösningsmedel [46, 48, 49]. Bensoesyra, cyklopentanon och 1-fenyl-1,2-propandion används inom livsmedelsindustrin [45, 50, 51]. 2-(1-oxopropyl)-bensoesyra har ännu inget känt användningsområde, men används laborativt för forskning [52]. 4,4'-metylenbis-bensenamin används för att framställa flera olika färgämnen och pigment [53].

9 Diskussion

9.1 Laborativa resultat och tidigare experiment

I följande stycken kommer det laborativa resultatet att diskuteras. Resultatet jämförs med tidigare experiment och användbarheten hos produkterna diskuteras.

9.1.1 Gas

Vid jämförelse av de tidigare studierna av pyrolys på ren PET (tabell 6.1) med resultatet från pyrolysen av polyester/elastan-tyget visas det att resultaten från den tidigare studien hade mycket mindre koldioxid, mer kolmonoxid och mer vätgas i gassammansättningen. En liknande mängd C_2H_4 uppvisades. Jämförelse av den tidigare studien med pyrolysen av PET visar att gasen i studien gav något mindre koldioxid och mer av de andra gaserna, se tabell 6.1, men överlag är sammansättningen relativt lik. Däremot är mängden bildad gas från polyester/elastan-tyget (29.4 vikt%) lägre än mängden bildad gas i den tidigare studien (39 vikt%). Mängden gas bildad från PET (41.9 vikt%) är mer likt tidigare resultat. Att resultatet från polyester/elastan-tyget avviker ifrån resultatet från ren PET är förväntat då inblandningen av elastanfibern troligen påverkar både sammansättningen och mängden gas som bildas.

Från de laborativa resultaten vid pyrolys av polyamid/elastan-tyget visades en gasmängd på 12.6 vikt%, se tabell 8.1. Gasens sammansättning presenteras i figur 8.1. De laborativa försöken gav en större mängd gas än de från tidigare studier på pyrolys av ren nylon (tabell 6.3). Det var stora skillnader i sammansättningen då den tidigare studien inte visade någon andel vätgas medan det laborativa resultatet visade en ganska stor del vätgas. En mycket större mängd CO_2 erhöles från de laborativa resultaten och mindre mängd CO och C_2H_4 . Det laborativa resultatet visade att ingen CH_4 bildades medans det i den tidigare studien bildades relativt mycket.

Mängden gas som bildades från provet med polyester/polyamid/elastan var 34,7 vikt%, se tabell 8.1. Anmärkningsvärt är att det är mer än för polyester/elastan- och polyamid/elastan-provet. Gasens sammansättning presenteras i figur 8.1 där det kan ses att ingen vätgas detekterades trots att tyget består till 20% av polyamid/elastan tyget. Andelen CO och CO_2 ligger mellan resultaten för polyester/elastan respektive polyamid/elastan. Dessutom hade blandningen en större andel C_2H_4 än både polyester/elastan och polyamid/elastan. Möjligtvis har den vätgas som borde bildats från pyrolysen av po-

lyamiddelen av blandningen reagerat med andra ämnen.

Utifrån resultaten med μ -GC av gaspåsarna (figur 8.1) visas att alla prover bildade en hög mängd koldioxid, mellan 50 och 70%. Detta innebär att den bildade gasen kommer vara svårare att nyttja. Dessutom bestod endast gasen ifrån blandningen av polyamid/elastan av en signifikant mängd vätgas. Vätgasen är oftast en önskvärd komponent då den ingår i syntesgas som används i flertalet processer. Dock bildades störst mängd koldioxid vid pyrolys av polyamid/elastan-blandningen. Detta innebär att om resten av gasen ska användas bör koldioxiden separeras bort vilket ökar produktionskostnaden samt energiåtgången och därmed även miljöpåverkan. Eftersom gasen som bildades från samtliga prover bestod av en förhållandevis stor mängd koldioxid jämfört med både kolmonoxid och vätgas är ingen av gaserna önskvärda, varken ur ett förbränningssyfte eller ett produktionssyfte. Däremot finns det viss möjlighet att avskilja koldioxiden och använda denna för fortsatt produktion. Genom att förbränna gasen finns det dock möjlighet att erhålla en mindre mängd energi som kan användas som en extra värmekälla till pyrolysisprocessen vilket kan ge en minskad energiåtgång för processen. Dock är det viktigt att ta hänsyn till att resultaten i laborationen inte visar alla sorters gaser som kan ha bildats, exempelvis HCN, eftersom dessa gaser också påverkar gasens kvalitet och därmed dess potentiella användningsområden. Då HCN även är en mycket giftig gas finns det också säkerhetsaspekter som hänsyn bör tas till om termokemisk återvinning skulle implementeras i stor skala.

9.1.2 Pyrolysolja

Vid pyrolysen estimerades det att mellan 38 och 78 vikt% olja bildades, se tabell 8.1, vilket är en signifikant skillnad mellan proven. Denna estimering bygger på antagandet att allt som inte blir till gas eller okonverterat bildar olja. Polyamid/elastan-blandningen gav upphov till betydligt mer olja, 77.41 vikt%, som innehöll betydligt färre olika produkter än de andra proverna. Det blev minst olja för PET, 38.97 vikt%. Detta är något lägre än för proverna från polyester/elastan och polyester/nylon/elastan vilka gav upphov till en liknande mängd olja, 47.14 respektive 44.56 vikt%. Som kan ses bidrar nylon och elastan till högre andel olja. Antalet produkter i proverna ökade även med antalet komponenter i blandningen.

Pyrolysen av ren PET gav 38.97 vikt% pyrolysolja vilket är något mindre än de 50 vikt% som erhöles i tidigare studie av Yoshiokas. Själva pyrolysoljan bestod till största del av bensoesyra, 60 mol%, vilket är relativt likt de 42 vikt% som oljan från Yoshiokas studie in-

nehöll. Skillnaden kan bero på att den tidigare studien utfördes under andra förhållanden. De fyra mest förekommande ämnen utgjorde över 80 mol% av den totala oljan. Dessa var Bensoesyra, 2-(1-oxypropyl)-bensoesyra, 1-fenyl-1,2-propandion och bensen, se tabell 10.2. Resterande ämnen utgjorde mindre än 2,8 mol% var och en stor del av dessa ämnen var bensoesyra med en eller flera sidogrupper.

För polyester/elastan blandningen blev 47.14 vikt% till olja. Likt för ren PET fås produkterna bensoesyra, bensen, 1-fenyl-1,2-propandion och 2-(1-oxypropyl)-bensoesyra men för polyester/elastan erhöles även tetrahydrofuran. Denna produkt stämmer inte heller överens med de tidigare studierna på pyrolys av polyuretan och skulle därmed kunna komma från elastanets polyeter bit eller från interaktioner mellan elastan och polyester. Dess andel i oljan, 14 mol%, är däremot väldigt hög jämfört med elastanets innehåll i provet, 8 vikt%. De kväven som suttit i elastanets rigida del återfinns inte i någon av de fem produkter som utgör majoriteten av pyrolysoljan från polyester/elastan-tyget. Alla kväven måste därmed återfinnas någonstans i de dryga 20 mol% av oljan som återstår, i gasen eller i det okonverterade. Ett exempel på produkt som innehåller kväve och finns i mindre mängd är benzonitril, vilken utgör 0.36 mol% av provet.

För nylon/elastan-blandningen erhöles väldigt mycket olja, 77.41 vikt%, men detta överensstämmer ganska bra med de tidigare experimenten på ren nylon 6,6 där närmare 90 vikt% blev olja. Den något mindre mängden olja kan bero på elastaninnehållet på 10 vikt%. Tidigare studier på polyuretan har fått 19-56 vikt% olja, om än vid betydligt högre temperatur (750-760°C), vilket därmed lär ha medfört den mindre oljemängden för blandningen. Den höga halten cyklopentanon, 28.9 mol%, låga andelen kaprolaktam samt den stora mängden vätgas tyder på att polyamiden i provet till största del var nylon 6,6. Likt i förra provet finns en mindre del tetrahydrofuran vilket tyder på att denna uppkommer från elastanets polyeterdel. I provet finns även 4,4-metylenbis-bensenamin vilken, på grund av dess struktur och kväveinnehåll, antas ha sitt ursprung i elastanets rigida del. Oljans fyra huvudsakliga produkter utgör närmare 60 mol% av provet, betydligt lägre än för de tidigare proverna. De återstående 40 mol% utgörs av ett fyrtiotal ämnen som var för sig utgör mindre än 2 mol% av oljan.

Provet med nylon/elastan har få aromater med kväve i och väldigt mycket okända ämnen vilket kan ses i tabell 8.2. Eftersom GC-FID känner igen aromatiska ämnen, tyder detta på att de flesta ämnen som bildades i pyrolysen av nylon/elastan var linjära ämnen och i princip alla kväveatomer sitter på linjära ämnen, troligtvis som nitriler. Även GC-MS

visade på att flertalet linjära nitriler bildades.

Provet med polyester/polyamid/elastan var det prov som resulterade i flest olika komponenter i pyrolysoljan. Detta var förväntat då det provet hade flest ingående komponenter som kunde brytas ner till flest molekyler. Alla pyrolyspanprodukter från detta prov som förekom i tillräckligt stor mängd för att redovisas i figur 8.2, förekom också i minst ett av de andra proverna. Det innebär att det inte bildades några produkter i nämnvärd mängd i detta prov som inte bildades i något av de andra proverna. Detta tyder på att samma huvudprodukter bildas vid pyrolys av fibrerna, oavsett vilken sammansättning fibrerna är i. Däremot påverkar sammansättningen mängden av molekyler som bildas.

Ett resultat som är intressant att diskutera för provet med polyester/polyamid/elastan är att benzonitril förekom i större mängd i detta prov än i något av de andra proven. I provet med alla tre fibrer utgjorde benzonitril 2.8 mol% och i det enda andra provet som innehöll benzonitril, polyester/elastan provet, utgjorde molekylen enbart 0.36 mol%. Då benzonitril innehåller kväve måste denna molekyl ha resulterat från nedbrytningen av elastan, för provet med polyester/elastan. Elastanmängden var dock lika stor i provet med polyester/elastan och polyester/polyamid/elastan, likaså var andelen av pelletsen som blev pyrolysolja ungefär lika stora för de två proverna. Därför är det intressant att det bildades förhållandevis mer benzonitril i provet med alla tre fibrerna. Detta visar att andelen av en produkt som bildas inte enbart beror på andelen ursprungsfiber i provet, utan sammansättningen fibrer kan även påverka mängden som bildas.

Ytterligare ett intressant resultat för polyester/polyamid/elastan-provet är att det inte bildas någon 4,4-metylenbis-benzenamin trots att detta var en av produkterna som förekom i relativt stor mängd i provet med polyamid/elastan. Strukturen på molekylen tyder på att den är en produkt från elastan. Att det inte bildas någon 4,4-metylenbis-benzenamin i provet med alla tre fibrerna visar att sammansättningen fibrer kan påverka inte bara mängden utan även typen av molekyler som bildas. Till exempel kan den delen i elastan som skulle ha bildat 4,4-metylenbis-benzenamin ha reagerat med någon del från polyester och bildat någon annan molekyl.

En stor del av ämnena som bildades i pyrolysoljan har en okänd mängd, se tabell 8.2 och 8.3. Många av dessa ämnen detekterades i GC-MS-analysen men den exakta kvantiteten av dessa är okänd. Detta beror på att GC-FID är kalibrerad enbart för ett 30-tal ämnen. Detta märks särskilt i polyamid/elastan-provet där endast 10% av de ingående kolato-

merna kan kvantifieras i produkterna. En anledning till att endast en liten andel kol kan kvantifieras i produkterna från polyamid/elastan-provet är att polyamid inte består av aromater och att det därför bildas mer linjära kolkjedor som inte detekteras av GC-FID. En annan anledning till att en liten mängd kolatomer kvantifieras är att mängden gas som erhålls är låg för polyamid/elastan-provet.

Kemikalierna som fanns i pyrolysoljan har en del spridda användningsområden och skulle därför eventuellt vara värdefulla för olika industrier såsom livsmedelsindustrin eller i kemiindustrin som baskemikalier. Som nämnt i resultatet bestod pyrolysoljan för alla proverna av väldigt många olika kemikalier, vilket är problematiskt eftersom ju fler komponenter oljan har, desto fler komponenter behöver separeras för att få ut önskade kemikalier. Möjligheten att separera ut kemikalierna som förekom i någorlunda stor mängd från resten av oljan är ingenting som har undersökts i detta arbete men kommer vara avgörande för om kemikalierna kommer vara användbara eller inte. Troligen är det möjligt att separera kemikalierna till en viss renhet men eftersom separationer ofta kräver mycket energi är det inte heller säkert att miljövinsten kommer vara tillräcklig med denna återvinningsmetod.

9.1.3 Felkällor och möjliga förbättringar

Under de olika stegen i laborationen och analysen kan flera potentiella felkällor förekommit som kan ha inverkan på resultatet. På grund av den mänskliga faktorn kan fel under laborationens gång uppstått. Exempelvis kan gas ha läckt ut från gaspåsen om den inte förslöts och molekylerna i SPA-sprutan kan ha läckt ut i rummet om inte locket sattes på tillräckligt snabbt då sprutan togs ut. För att förhindra denna typen av fel är det bra att upprepa experimenten flera gånger för att undersöka om något resultat avviker.

Proverna i gaspåsar och SPA-sprutor som samlades upp vid förbränningen av oljerester mellan pyrolysproverna användes inte eftersom heliumgasen stängdes av i förtid för vissa prover. Hade detta samlats in med spårämnet på hade andelen kol i det okonverterade materialet kunnat kvantifieras. I och med att andelen okonverterat inte erhöles på detta sätt användes resultatet från TGA. Då detta inte utförs under samma betingelser kan dessa resultat skilja sig något men det anses vara en bra approximation.

Vid GC-MS analysen var en möjlig felkälla att proven med pyrolysolja från nylon/elastan och polyester/nylon/elastan innehöll fällningar, vilket är fasta delar som inte är lösta i

oljan. På grund av detta var proven inte helt homogena vilket betyder att oljan som injicerades för analys möjligtvis inte representerar innehållet som fanns i provet fullständigt. För att undvika sådana problem i framtiden kan kortare tid mellan pyrolysen och GC-MS analysen eftersträvas så fällningar inte hinner bildas.

Ett annat problem vid GC-MS analysen var att topparna i kromatogrammet blev små och därför något otydliga vilket gör det problematiskt att urskilja vilka toppar som tillhör vilka ämnen. För att få tydligare toppar vid GC-MS analysen behövs en högre koncentration i proverna, vilket kan uppnås genom att mata in mer pellets. Det kan dock göra att väldigt höga koncentrationer för gasproverna erhålls och att pyrolysen måste köras en längre tid. Det är även möjligt att pyrolysen gav fler ämnen som inte kunde ses vid analysen i GC-MS då de var i för låga koncentrationer.

För att veta vilka ämnen som fås ut vid GC-MS användes dess tillhörande dataprogram. Dataprogrammet matchade topparna efter deras masspektrum och retentionstid till det mest troliga ämnet. Matchen tilldelas en score vilket är ett viktat betyg på en procentskala och ger ett mått på hur tillförlitlig matchen är. En score på 75-85 anses som en god match och allt där över anses väldigt bra. Även om de flesta av ämnena har fått en score som anses bra eller väldigt bra finns det en risk att en eller ett fåtal av dessa är fel. Detta hade kunnat vara anledningen till att nirvanol detekteras, vilken hade en score på 80.

Kläderna som pyrolyserades har använts och tvättats vilket gör att de kan innehålla spårämnen från detta. Ett exempel är återigen nirvanol, vilket kan ha kommit från sköljmedel [54].

9.2 Återvinning och återanvändning - idag och i framtiden

För att göra textilier hållbara så behöver förändring ske över hela värdekedjan. Det mest effektiva sättet att minska textilindustrins påverkan på människor och miljö är genom förebyggande åtgärder, framför allt genom återanvändning. För att den cirkulära ekonomin ska ge största miljönytta krävs det att flödet av textil har en låg hastighet, vilket uppnås genom en lång användarfas. Detta skulle kunna åstadkommas genom att utveckla hyrningsstjänster för kläder så att konsumenter kan uttrycka sin personlighet genom plaggen utan att behöva handla nya. Ett annat alternativ är att sälja vidare använda kläder och på så sätt bidra till en kvalitativ second hand-marknad. Om plagg skänks till second hand-affärer är det viktigt att ungefär lika mycket kläder som skänks också köps därifrån, för att balansera ut det stora överskott textilier som dessa butiker

i nuläget har. Dock bör inte dessa plagg skänkas till utvecklingsländer utan bör istället stanna kvar i det svenska systemet. I nuläget tar de skänkta plaggen över den inhemska textilindustrin i många länder och hämmar därigenom inhemska företags möjligheter att utvecklas.

Som beskrivet är det ur miljösynpunkt viktigast att öka plaggens användarfas, men när dessa plagg har kommit till slutet av sin livslängd så är det ur ett miljöperspektiv av värde att återvinna dessa. Genom det kommande producentansvaret är ambitionen att insamling av textilier till återvinning ökar markant, vilket ger ett incitament att utveckla återvinningsprocesserna så att de kan användas i fullstor skala. Mekanisk, kemisk och termokemisk återvinning har olika fördelar och fungerar på olika sätt vilket gör att de kompletterar varandra. Mekanisk återvinning kräver en låg energiåtgång, men ger produkter av en lägre kvalitet. Den kemiska processen ger syntetiska fibrer i samma kvalitet som innan, men kräver rena flöden utan exempelvis blandningar och färgämnen. De plagg som den kemiska återvinningen inte kan hantera tros däremot den termokemiska återvinningen kunna hantera. Alla tre återvinningsmetoder bör därmed användas parallellt för att hantera så mycket olika textilavfall som möjligt.

När dessa återvinningsprocesser utformas är det viktigt att det görs på ett sådant sätt att de kan anpassas utefter de material som är aktuella. Det är i dagsläget svårt att avgöra vilka material och i vilka mängder som kommer användas framöver då det sker mycket förändringar inom branschen och allt fler modeföretag arbetar mer aktivt med miljöfrågor. Av anledningar som dessa är det därmed viktigt att återvinningsprocesserna är flexibla och kan justeras utefter utbudet av material.

Det är även viktigt att poängtera att ur ett större perspektiv så kan det vara lika värdefullt om de återvunna textilierna har ett användningsområde, även om det inte är som nya textilier. Oavsett så kan väl utvecklade återvinningsprocesser leda till lägre miljöpåverkan från textilindustrin.

En mer cirkulär textilindustri leder till en minskad produktion, vilket kan slå hårt ekonomiskt mot de människor som jobbar med detta, framför allt i utvecklingsländer. Detta bör tas i beaktning i omställningen till en cirkulär ekonomi och i utvecklandet av återvinningsprocesser. Det är viktigt att arbeta förebyggande så att sådana problem inte uppstår för att omställningen ska kunna ses som etiskt försvarbar. Samtidigt är den nuvarande textilproduktionen hälsofarlig för de som arbetar med den då mycket kemi-

kalier används. Produktionen kräver stora mängder vatten, vilket leder till att sjöar i närområdena torkas ut. Ur ett etiskt perspektiv är det därför inte hållbart att fortsätta producera textilier på det sätt som det sker idag.

9.3 Fortsatt arbete

Det behövs ett fortsatt laborativt arbete på material med blandade textilfibrer, både med olika fibrer och sammansättningar. Pyrolysen bör även köras vid andra temperaturer, både något lägre och högre, för att undersöka vilken påverkan detta får och för att optimera andelen användbara produkter. Det bör även utföras laborativa försök på kontaminerade kläder, exempelvis arbetskläder, för att kontrollera att detta inte medför någon större eller problematisk påverkan. Detta projekt har inte heller undersökt om eller hur pyrolysoljans olika komponenter kan separeras. Detta krävs för att få användbara och värdefulla produkter.

I arbetet har det inte utförts några beräkningar på hur mycket resurser eller utsläpp som en omställning till termokemisk återvinning medför. Detta bör göras samt jämföras med siffror för alternativa återvinningmetoder (återanvändning, kemisk återvinning och mekanisk återvinning) för att hitta den bästa ur miljösynpunkt. Detta görs förslagsvis genom att utföra livscykelanalyser för de olika alternativen.

Samhällskostnaderna av de olika återvinningsprocesserna bör även det studeras fortsatt. Det bör, enligt I3, även studeras hur dessa kostnader ändras om det textila användandet minskar i framtiden (Intervju I3 2021-04-27). Samtidigt bör det undersökas hur väl metoderna går att implementera. Dessa faktorer, ekonomi, miljö och möjlighet att implementera, behöver sedan vägas ihop för att välja ut den bästa metoden eller kombinationen av metoder.

10 Slutsatser

För att nå FN:s globala mål och därmed minska textiliers miljöpåverkan behöver det läggas fokus på att förlänga användarfasen. Det är även viktigt att gå mot en mer hållbar avfallshantering och beslutet om producentansvar är ett betydelsefullt steg mot detta. För att uppnå en mer cirkulär textilindustri krävs det att olika återvinningsmetoder används parallellt, däribland termokemisk återvinning. Omställningen kommer resultera i flera både positiva och negativa etiska konsekvenser. Därmed anses omställningen vara värdefull, men de negativa konsekvenserna behöver förebyggas.

Rapporten har även funnit att vid pyrolys av polyester, polyamid och elastan bildas flertalet komponenter i pyrolysoljan som kan användas inom kemiindustrin. Dock krävs det att dessa kemikalier är separerbara för att de ska vara värdefulla. Vissa av de produkter som bildas kan användas vid tillverkning av nya fibrer men de flesta har andra användningsområden. När fler komponenter pyrolyseras bildas det en mer komplex blandning produkter men det bildas samma huvudprodukter oavsett sammansättning av syntetiska fibrer in i pyrolysen, vilket gör det till en flexibel process. Gasen som erhålls består av hög mängd koldioxid och är därför inte attraktiv för förbränning men kan användas till andra syften. Sammantaget tyder det på att termokemisk återvinning kan vara en viktig del för att minska miljöpåverkan från textilindustrin.

Referenser

- [1] Textile Exchange. Preferred Fiber & Materials Market Report 2020 [Internet]; 2020. Hämtad från: https://textileexchange.org/wp-content/uploads/2020/06/Textile-Exchange-Preferred-Fiber-Material-Market-Report_2020.pdf.
- [2] Ellen MacArthur Foundation. A New Textiles Economy: Redesigning fashion's future [Internet]; 2017. Hämtad från: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/a-new-textiles-economy-redesigning-fashions-future>.
- [3] Niinimäki K, Peters G, Dahlbo H, Perry P, Rissanen T, Gwilt A. The environmental price of fast fashion [Internet]. Nature Reviews Earth & Environment. 2020;1143–1148. Hämtad från: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9>.
- [4] Östlund A, Roos S, Sweet S, Sjöström E. Investor Brief: Sustainability in Textiles and Fashion [Internet]. 111 34 Stockholm: Mistra; 2020. Mistra Investor Brief no. 2. Hämtad från: https://www.mistra.org/wp-content/uploads/2020/09/mistradialogue_rapport_investor_brief_textiles_final.pdf.
- [5] Miljödepartementet. Producentansvar för textil – en del av den cirkulära ekonomin [Internet]. Stockholm: Norstedt; 2020. Hämtad från: <https://www.regeringen.se/4ada18/contentassets/b6ad93ca7b9a40518355624c010dea7d/producentansvar-for-textil--en-del-av-den-cirkulara-ekonomin-sou-202072>.
- [6] Östlund A, Wedin H, Bolin L, Berlin J, Jönsson C, Posner S, et al. Textilåtervinning [Internet]. Stockholm: Naturvårdsverket; 2015. Rapport 6685. Hämtad från: <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-6685-7.pdf?pid=15536>.
- [7] Deutscher Fachverlag GmbH. The Fiber Year 2019 [Internet]. Frankfurt am Main: Deutscher Fachverlag GmbH; 2019. Hämtad från: <https://www.techtextrends.com/news/research-institutes-education/World-fiber-production-2018-The-Fiber-Year-2019-18677>.
- [8] Naturvårdsverket. Materialen i våra kläder [Internet];. Hämtad från: <https://www.naturskyddsforeningen.se/vad-du-kan-gora/gron-guide/materialen-i-vara-klader>.

- [9] Chapagain AK, Hoekstra AY, Savenije HHG, Gautam R. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries [Internet]. Ecological Economics. 2006;60(1):186–203. Hämtad från: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.11.027>.
- [10] Textile Exchange. Quick Guide to Organic Cotton [Internet]. Lamesa, Texas: Textile Exchange; 2017. Hämtad från: https://textileexchange.org/wp-content/uploads/2017/06/Textile-Exchange_Quick-Guide-To-Organic-Cotton_2017.pdf.
- [11] Pamlin D, Hedström G. Regenerative lifestyles. Houdini Cybercom regenerative lifestyles initiative; 2020. White paper 1.0. Hämtad från: https://api.houdinisportswear.com/storage/F74167C85FE766F9FBD77C5E700558683347CD53F0B3F45552EA1F6BB4D45549/eb803f601782441ca0ac371897fa30c9/pdf/media/85f49217afc34a6bbf92ab8e1e532371/Houdini_Regenerative-Lifestyles-Halfearth-1_0.pdf.
- [12] Sandin G, Roos S, Spak B, Zamani B, Peters G. Environmental assessment of Swedish clothing consumption - six garments, sustainable futures [Internet]. Lindholmspiren 7A, 417 56 Göteborg: RISE; 2019. Mistra Future Fashion report number 2019:05. Hämtad från: <http://mistrafuturefashion.com/wp-content/uploads/2019/08/G.Sandin-Environmental-assessment-of-Swedish-clothing-consumption.MistraFutureFashionReport-2019.05.pdf>.
- [13] Carlsson A, Hemström K, Edborg P, Åsa Stenmarck, Sörme L. Kartläggning av mängder och flöden av Textilavfall [Internet]. 601 76 Norrköping: Svenska MiljöEmissionsData; 2011. 46. Hämtad från: <http://naturvardsverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1115123/FULLTEXT01.pdf>.
- [14] Hultén J, Johansson M, Dunsö O, Jensen C. Plockanalyser av textilier i hushållens restavfall [Internet]. 601 76 Norrköping: Svenska MiljöEmissionsData; 2016. 176. Hämtad från: <https://www.naturvardsverket.se/upload/miljoarbete-i-samhallet/miljoarbete-i-sverige/regeringsuppdrag/2016/redovisade/plockanalyser-av-textilier-i-hushallens-restavfall-smed-rapport-2016-06-17>.

pdf.

- [15] Enviromental Protection Agency. Material-Specific Data [Internet];. Hämtad från: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/textiles-material-specific-data>.
- [16] Rittfors J. Thermochemical textile recycling [Internet]. Göteborg: Department of Space, Earth and Enviroment, Chalmers University of Technology; 2020. Hämtad från: https://odr.chalmers.se/bitstream/20.500.12380/301040/1/master_thesis_julia_rittfors.pdf.
- [17] Peters GM, Sandin G, Spak B. Environmental Prospects for Mixed Textile Recycling in Sweden [Internet]. ACS Sustainable Chem Eng. 2019;7:11682–11690. Hämtad från: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b01742>.
- [18] Statens Offentliga utredningar. Från värdekedja till värdecykel – så får Sverige en mer cirkulär ekonomi [Internet]. Stockholm: Statens Offentliga utredningar; 2017. SOU 2017:22. Hämtad från: https://www.regeringen.se/49550d/contentassets/e9365a9801944aa2adce6ed3a85f0f38/fran-vardekejda-till-vardecykel-2017_22.pdf.
- [19] Börjesson P. Varför en cirkulär biobaserad ekonomi? [Internet]. Fokus Forskning. 2017 januari. Hämtad från: <https://www.fokusforskning.lu.se/2017/01/11/varfor-en-cirkular-biobaserad-ekonomi/>.
- [20] Regeringskansliet. Att förändra vår värld: Agenda 2030 för hållbar utveckling [Internet]. Stockholm: Regeringskansliet;. Hämtad från: https://www.regeringen.se/49c2e4/globalassets/regeringen/dokument/finansdepartementet/agenda-2030/att-forandra-var-varld_agenda-2030-for-en-hallbar-utveckling.png.pdf.
- [21] European Comission. Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive)[Internet];. Hämtad från: <https://ec.europa.eu/environment/waste/framework/>.
- [22] Roos S, Sandin G, Peters G, Spak B, Bour LS, Perzon E, et al. white paper on textile

- recycling. Mölndal, Sweden: Mistra Future Fashion; 2019. 2019:09. Hämtad från: <http://mistrafuturefashion.com/wp-content/uploads/2019/10/S.-Roos.-White-paper-on-textile-recycling.-Mistra-Future-Fashion.pdf>.
- [23] Charles C. The Outstanding Potential of Teijin's ECO CIRCLE™ System [Internet];. Teijin limited; 2016. Hämtad från: <https://silo.tips/download/developing-a-practical-chemical-recycling-technology-for-polyester-weaving-the-1>.
- [24] Datta J, Blazek K, Wloch M, Bukowski R. A new approach to Chemical Recycling of Polyamid 6.6 and Synthesis of Polyurethanes with recovered Intermediates [Internet]. J Polym Environ. 2018;28:4415–4429. Hämtad från: <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1314-4>.
- [25] Aquafil S p A. Aquafil S.p.A. Econyl Endless Possibilities [Internet];. Hämtad från: https://www.econyl.com/assets/uploads/ECONYL_brochure_EN_Web-2.pdf.
- [26] Sandrini MG. Sustainability Report 2015 [Internet]. Arco, Trentino, Italien: Aquafil Group; 2016. Hämtad från: https://www.aquafil.com/assets/uploads/RS_Aquafil_ENG_2015_05.pdf.
- [27] Houdini Sportswear, Albaeco, Mistra Future Fashion. Planetary Boundaries Assessment 2018 This is Houdini; 2018. Hämtad från: https://api.houdinisportswear.com/storage/2A69199BFCBA925CC9260D61F41301EA566C760FB9A727B5DABB2C330C13D1BC/08df8496f36f49f0bb821fdeafdd775e/pdf/media/e5eec5e201b242e9a2aa14aba9c3b696/Houdini_Planetary_Boundaries_Assessment_2018.pdf.
- [28] Haeggman M, Moberg F, Sandin G. Planetary Boundaries analysis for Houdini Sportswear – a Pilot Study. Houdini Sportswear, Albaeco and Mistra Future Fashion;. Hämtad från: https://api.houdinisportswear.com/storage/2A69199BFCBA925CC9260D61F41301EA566C760FB9A727B5DABB2C330C13D1BC/08df8496f36f49f0bb821fdeafdd775e/pdf/media/e5eec5e201b242e9a2aa14aba9c3b696/Houdini_Planetary_Boundaries_Assessment_2018.pdf.
- [29] Richards T. Termokemisk återvinning av polymerer [Internet]. Borås: Högskolan i Borås;. Hämtad från: <https://databas.resource-sip.se/storage/Slutrapport%20%C3%85tervinning%20av%20polymerer.pdf>.

- [30] U S Department of Energy. Pyrolysis and Other Thermal Processing [Internet];. Hämtad från: <https://web.archive.org/web/20070814144750/http://www1.eere.energy.gov/biomass/pyrolysis.html>.
- [31] U S Department of Energy. Biomass Gasification [Internet];. Hämtad från: <https://web.archive.org/web/20070814002615/http://www1.eere.energy.gov/biomass/gasification.html>.
- [32] Al-Saydeh SA, Zaidi SJ. Carbon Dioxide Conversion to Methanol: Opportunities and Fundamental Challenges [Internet]. IntechOpen; 2018. Hämtad från: <https://doi.org/10.5772/intechopen.74779>.
- [33] Palacios-Mateo C, van der Meer Y, Seide G. Analysis of the polyester clothing value chain to identify key intervention points for sustainability [Internet]. Environmental Sciences Europe. 2021;33(2). Hämtad från: <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00447-x>.
- [34] Yoshioka T, Grause G, Eger C, Kaminsky W, Okuwaki A. Pyrolysis of poly(ethylene terephthalat) in a fluidised bed plant [Internet]. Polymer Degradation and Stability. 2004;86:499–504. Hämtad från: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.06.001>.
- [35] Kaminsky W, Predel M, Sadiki A. Feedstock recycling of polymers by pyrolysis in a fluidised bed [Internet]. Polymer Degradation and Stability. 2004;85(3):1045–1050. Hämtad från: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2003.05.002>.
- [36] Lehrle RS, Parsons IW, Rollinson M. Thermal degradation mechanisms of nylon 6 deduced from kinetic studies by pyrolysis-g.c. [Internet]. Polymer Degradation and Stability. 2000 Jan;67:21–33. Hämtad från: [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(99\)00112-3](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(99)00112-3).
- [37] Bockhorn H, Donner S, Gernsbeck M, Hornung A, Hornung U. Pyrolysis of polyamide 6 under catalytic conditions and its application to reutilization of carpets. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2001 April;58-59:79–94. Hämtad från: [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(00\)00187-X](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(00)00187-X)
- [38] Senoo H, Tsuge S, Takeuchi T. Pyrolysis-Gas Chromatographic Analysis of 6-66-

- Nylon Copolymers [Internet]. Journal of Chromatographic Science. 1971 May;9:315–318. Hämtad från: <https://doi.org/10.1093/chromsci/9.5.315>.
- [39] Kaminsky W. SFC Academy 2019 Waste Gasification course; 2019. Chalmers.
- [40] Wampler TP. Applied Pyrolysis Handbook, 2 Ed. Boca Raton: CRC Press; 2020.
- [41] Hodakel B. What is Elastane Fabric: Properties, How its Made and Where. Sewport. 2021 Mars. Hämtad från: <https://sewport.com/fabrics-directory/elastane-fabric> 21-03-30].
- [42] Kaminsky W. Recycling of Polymers by Pyrolysis [Internet]. Journal de Physique IV Proceedings. EDP Sciences; 1993. p. C7–1543–C7–1552. Hämtad från: <https://doi.org/10.1051/jp4:19937241>.
- [43] Kaminsky W. Feedstock Recycling of Nitrogen Containing Polymers by Fluidized Bed Pyrolysis [Internet]. ISFR. University of Hamburg, Institute for Technical and Macromolecular Chemistry; 2011. p. 13–14. Hämtad från: http://www.fsrj.org/act/7_nenkai/14-6-ISFR/Proceeding-IFSR2011/1-4.pdf.
- [44] Li S. PET recycling via gasification - Influence of operating conditions on product distribution [Internet]. 412 96 Göteborg: Department of Space, Earth and Enviroment, Chalmers University of Technology; 2019. Hämtad från: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/257443/257443.pdf>.
- [45] Pubchem [Internet] Bethesda (MD): National Library of Medicine (US), National Center for Biotechnology Information; 2004- . PubChem Compound Summary for CID 243, Benzoic acid;. Hämtad från: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Benzoic-acid>.
- [46] Pubchem [Internet] Bethesda (MD): National Library of Medicine (US), National Center for Biotechnology Information; 2004- . PubChem Compound Summary for CID 8028, Tetrahydrofuran;. Hämtad från: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Tetrahydrofuran>.
- [47] Ngo DT, Tan Q, Wang B, Resasco DE. Aldol Condensation of Cyclopentanone on Hydrophobized MgO. Promotional Role of Water and Changes in the Rate-Limiting Step upon Organosilane Functionalization [Internet]. ACS Catal. 2019;9(4). Hämtad

från: <https://doi.org/10.1021/acscatal.8b05103>.

- [48] Pubchem [Internet] Bethesda (MD): National Library of Medicine (US), National Center for Biotechnology Information; 2004- . PubChem Compound Summary for CID 241, Benzene;. Hämtad från: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Benzene#section=Structures>.
- [49] Pubchem [Internet] Bethesda (MD): National Library of Medicine (US), National Center for Biotechnology Information; 2004- . PubChem Compound Summary for CID 7505, Benzonitrile;. Hämtad från: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Benzonitrile>.
- [50] Pubchem [Internet] Bethesda (MD): National Library of Medicine (US), National Center for Biotechnology Information; 2004- . PubChem Compound Summary for CID 8452, Cyclopentanone;. Hämtad från: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cyclopentanone#section=Molecular-Formula>.
- [51] Pubchem [Internet] Bethesda (MD): National Library of Medicine (US), National Center for Biotechnology Information; 2004- . PubChem Compound Summary for CID 11363, 1-Phenyl-1,2-propanedione;. Hämtad från: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1-Phenyl-1_2-propanedione.
- [52] Combi-blocks. Safety Data Sheet 2-Propionylbenzoic acid;. Hämtad från: <http://www.combi-blocks.com/msds/QY-0772.pdf>.
- [53] Pubchem [Internet] Bethesda (MD): National Library of Medicine (US), National Center for Biotechnology Information; 2004- . 4,4'-Methylenebis(N,N-dimethylaniline);. Hämtad från: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/4_4_-Methylenebis_N_N-dimethylaniline.
- [54] A Danneels et al , uppfinnare; Procter and Gamble Co, Patentinnehavare,. Highly concentrated fabric softener compositions and articles containing such compositions;. Europeiskt patent EP1280882A1. 2014-03-12.

Bilaga 1 - Konfigurering av GC-430

Carrier gas: Helium

FID gas: Hydrogen

Make up gas: Helium

Column: BR-17 ms 30m x 0.25 mm, fused silica

Ferrules: Graphite

Inlet Liner: Focus liner with quartz wool

Syringe volume: 10 uL

Autosampler:

Inj Mode: Std (Split/Splitless)

Split ratio 1:30

Injector temperature: 350°C

Column flow: 1 ml/min, constant flow

Detector temperature: 350°C

Detector gas flow:

Helium: 25 ml/min

H2: 30 ml/min

Air: 300 ml/min

Temperatureprofile

Rate [°C/min]	Step [°C]	Time [min]	Total [min]
Initial	50	5.00	5.00
8.0	120	0,00	13.75
4.0	150	0.00	21.26
8.0	350	7.50	53.75

Bilaga 2 - Konfigurering av GC-MS

Autoinjector: Agilent G4513A Autoinjector

Injection volume: 1 μ L

GC: Agilent 7890A GC

Inlet temperature: 300 °C

Pressure: 7.6522 PSI

Septum Purge flow: 3 mL/min

Total flow: 54 mL/min

Split: 50:1

Split flow: 50 mL/min

Carrier gas: Helium

Column: Agilent HP-5MS UI (30m x 0.250 mm x 0.25 μ m)

Flow: 1 mL/min

Pressure: 7.6522 PSI

Average Velocity: 36.445 cm/sec

Holdup Time: 1.3719 min

Oven

Initial 50 °C, hold time 5 min, run time: 5 min

8 °C/min, 120 °C, hold time 0 min, run time 13.75 min

4 °C/min, 150 °C, hold time 0 min, run time 21.25 min

8 °C/min, 275 °C, hold time 5 min, run time 41.875 min

Aux heaters

Thermal Aux 2 (MSD transfer line): 310 °C

MS: Agilent 5977A MSD

Solvent delay: 2 min

Quadrupole settings:

Start Mass: 30 m/z

End Mass: 330 m/z

Threshold: 150

Scan speed (u/s): 3.125 [N=1]

Frequency (Scans/sec): 8.5

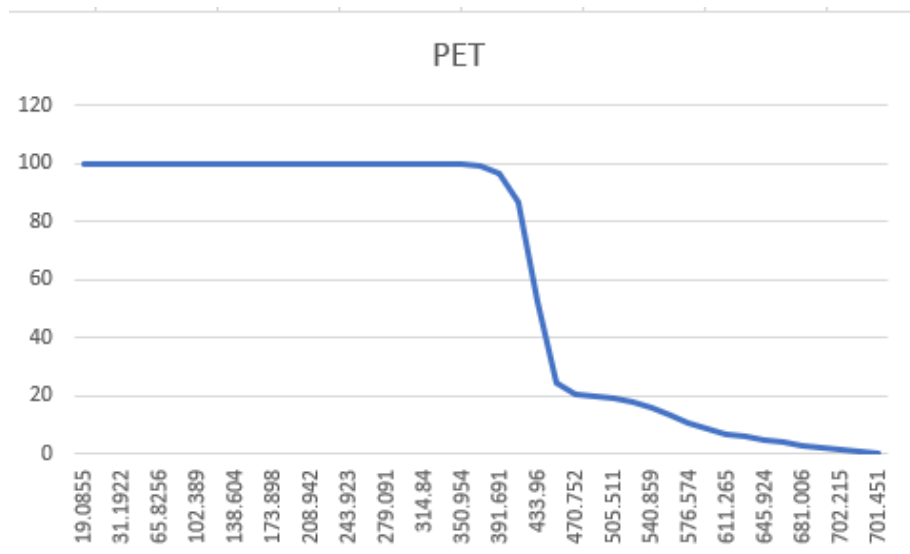
Cycle time (ms): 117.36

Step Size (m/z): 0.01

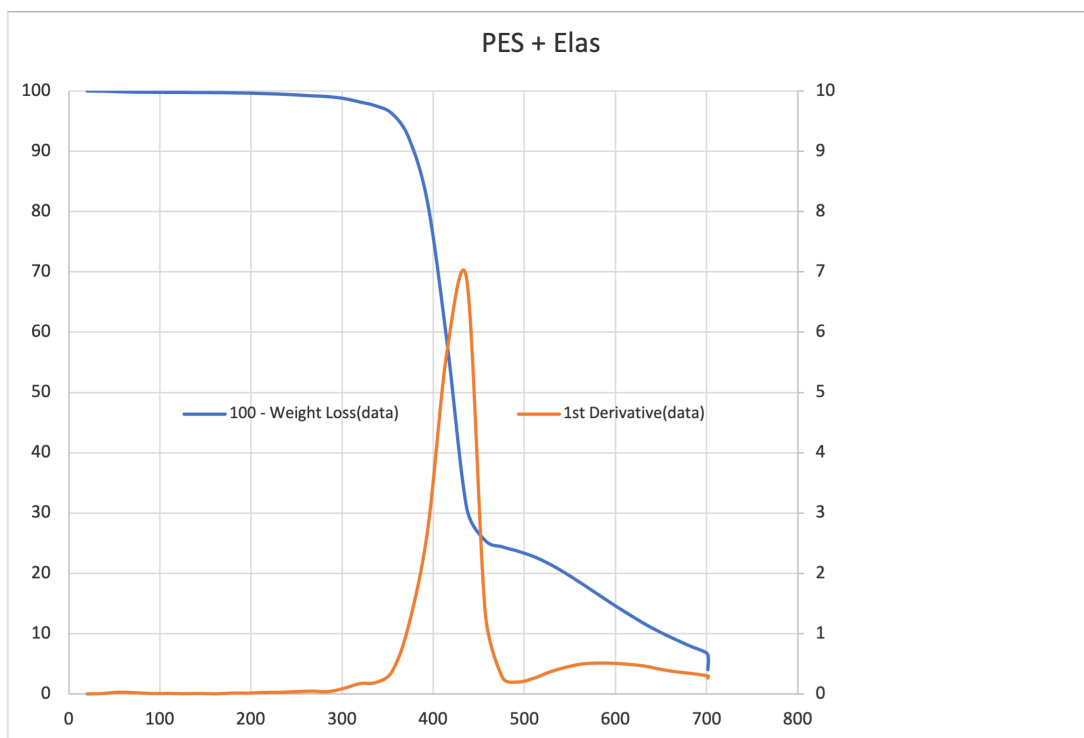
MS source temperatur: 230 °C

MS Quad: 150 °C

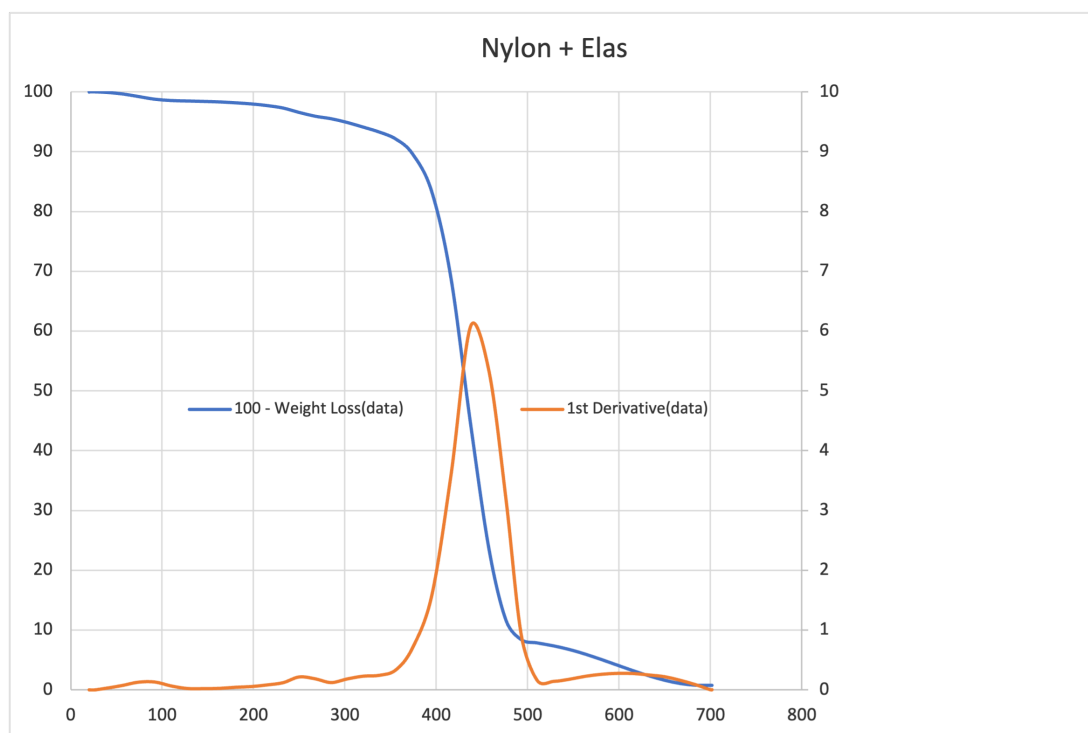
Bilaga 3 - TGA diagram



Figur 10.1: Resultat för TGA analysen för PET



Figur 10.2: Resultat för TGA analysen för poyester och elasthan



Figur 10.3: Resultat för TGA analysen för nylon och elastan

Bilaga 4 - Tabellerat resultat från GC-MS och μ -GC

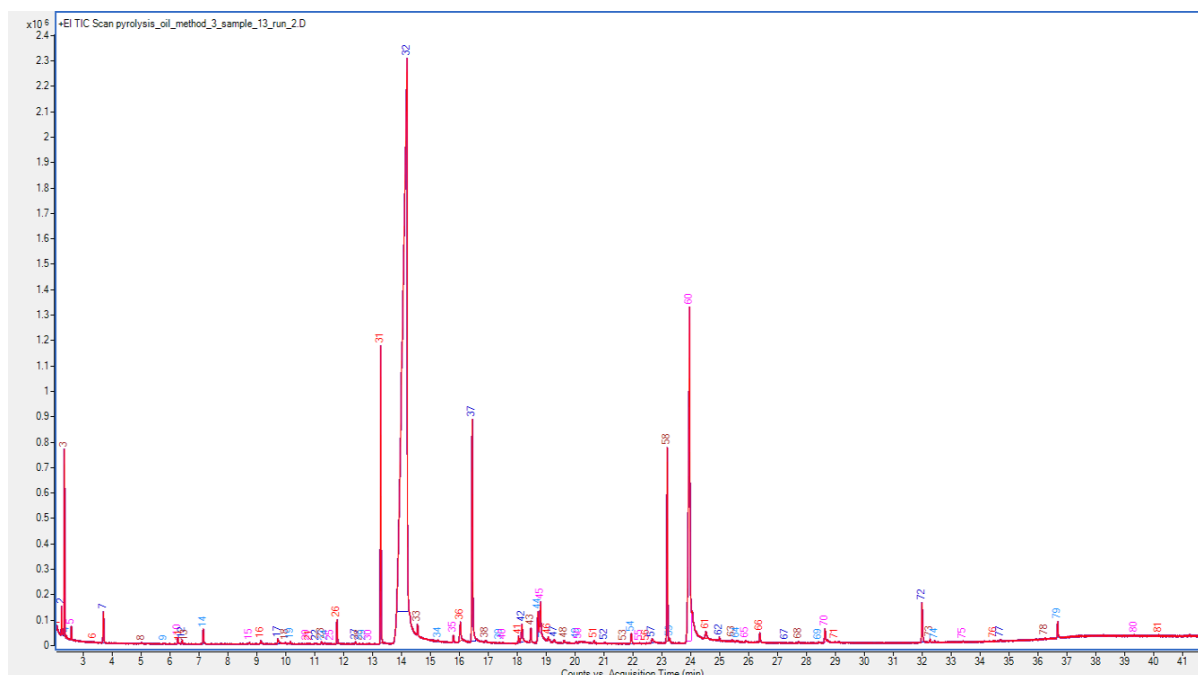
Tabell 10.1: Resultat från gasprovsanalyser i mol%

Ämne	H_2	CO	CO_2	C_2H_4	C_3H_x
PET	0	40,8	52,7	6,4	-
Polyester/Elastan	0,5	32	58	9,5	-
Polyamid/Elastan	15,4	8,9	69,7	4,2	1,8
Polyester/Polyamid/Elastan	0,2	30,6	59,5	9,7	-

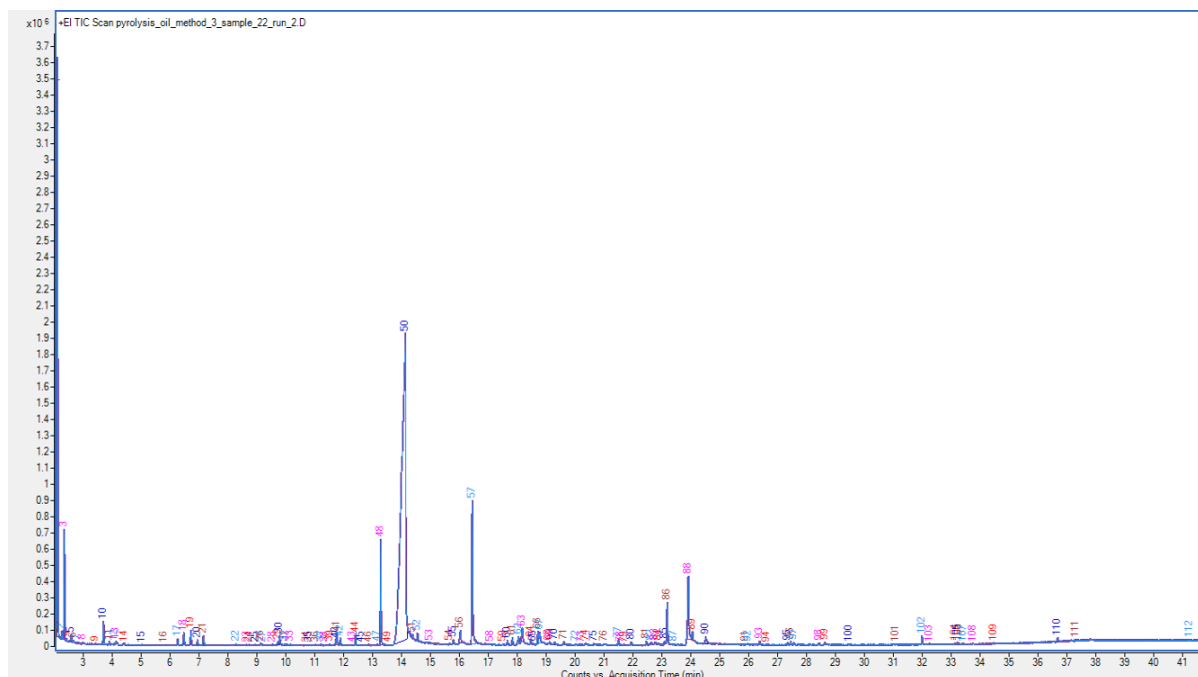
Tabell 10.2: Resultat på GC-MS analys i % av totalarea

Ämne	PET	PE/El	PA/El	PE/PA/El
Bensoesyra	60.1	55.3	-	43.7
2-(1-oxopropyl)-bensoesyra,	12.8	3.2	-	1.3
1-Fenyl-1,2-Propanedione	5.2	3.3	-	2.4
Bensen	2.9	3.1	14.7	4.8
Tetrahydrofuran	-	13.8	9.9	15.7
4,4-metylenbis-bensenamin	-	-	4.1	-
Bensonitril	-	0.36	-	2.8
Cyclopentanon	-	-	28.9	2
Övriga ämnen	10	15.4	31.6	24.2

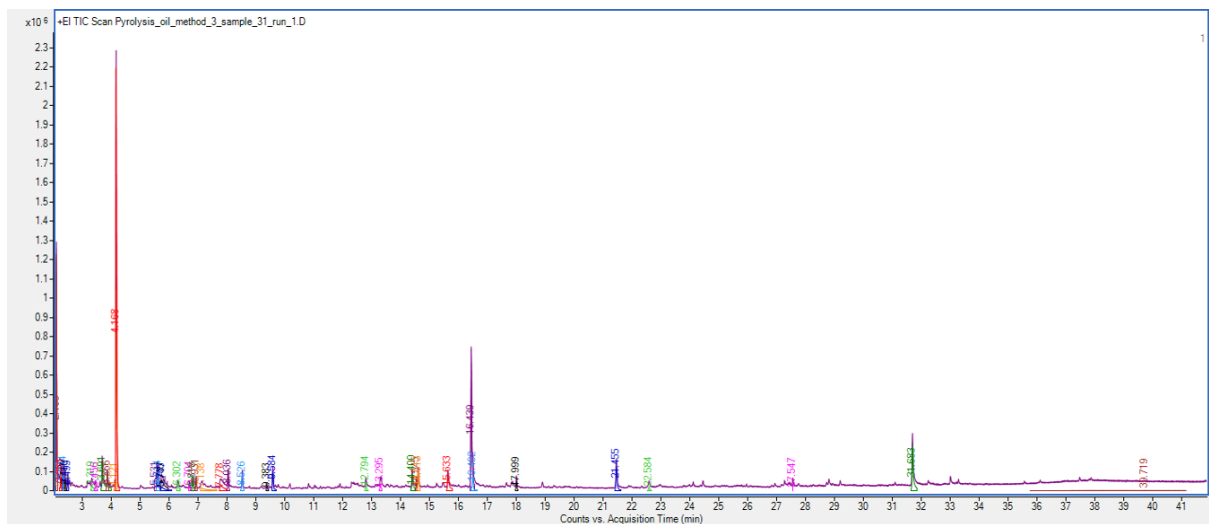
Bilaga 5 - Kromatogram från GC-MS



Figur 10.4: Kromatogram av PET



Figur 10.5: Kromatogram av polyester och elastan blandningen



Bilaga 6 - De ämnen som kan kvantifieras i GC-FID

Benzene

Toluene

p-Xylene

o-Xylene

Styrene

Methylstyren40

Methylstyren60

Phenol

2,3-benzo(b)furan

Indene

o-Cresol

p-Cresol

Acetophenone

Bensoicacid

1,2-dihydronaphthalene

Naphthalene

2-MethylNaphthalene

1-MethylNaphthalene

Biphenyl

Axenaphthene

Dimethyl terephthalate

Dibenzofuran

1-naphtol

2-naphtol

flourene

Xantene

Phenantrene

Anthracene

Pyrene

Crysene/Triphenylene