
Examensarbete för Teknologie Kandidatexamen
med huvudområde Textilteknologi
2015-06-01
Rapportnummer 2015.2.19

Återvinning av blandmaterial

Polyamid och Polyester

Amanda Johansson (S109191@student.hb.se) och Hanna Ljungholm (s122071@student.hb.se)



TEXTILHÖGSKOLAN
HÖGSKOLAN I BORÅS

SAMMANFATTNING

Om människor fortsätter med det konsumtionsbeteende som råder idag kommer jorden resurser ta slut. Den fossila råvaran petroleum används vanligtvis vid framställning av polyester och polyamid. Petroleum har en 100 000 årlig process, vilket är en ofantlig skillnad i förhållande till den takt som det förbrukas. Därför har eventuella möjligheter att återskapa en ny filament av återvunnet syntetiskt blandmaterial undersökts i detta arbete.

Det finns befintliga metoder för att återvinna polyester och polyamid som homogena material. Dock vid återvinning i en gemensam process av materialen får den slutliga produkten en försämrad kvalitet. Mekanisk och kemisk återvinning fungerar för att framställa syntetiska filament men i dagsläget kan endast den kemiska ge likvärdig kvalitet på det återvunna filamentet i förhållande till den jungfruliga.

Det har hittats ett flertal separationsmetoder som antas kunna tillämpas till blandmaterial. Olika egenskaper såsom densitet, polaritet och laddningsmöjligheter kan utnyttjas för att separera polymererna. Polyester och polyamid antas kunna separeras, dock görs inte detta på industriell basis troligtvis på grund av kvantitet, resurser och pris.

Nyckelord; polyamid, polyester, återvinning, återvinning blandningsmaterial, återvinning av polyamid, återvinning av polyester, separationsmetoder, hållbarhet.

ABSTRACT

If people continue with the present consumption behaviour, the earth's resources will run out. The fossil raw material petroleum is normally used in the manufacture of polyester and polyamide. Petroleum has a 100 000 annual process, which is a huge difference compared to the rate at which it is consumed. Therefore, any opportunities to recreate a new fibre from recycled synthetic blend materials are studied in this work.

There are existing methods to recycle polyester and polyamide as homogeneous materials. However, the recovery in a joint process get the final product a degraded quality. Mechanical and chemical recycling makes it possible to produce new synthetic filaments, but in the current situation, the chemical will provide comparable quality of the recycled filament in relation to the virgin.

Several separation methods can be applied to the blend material. Various properties such as density, polarity and charging possibilities can be used to separate polymers. Polyester and polyamide are assumed to be separated, however, is not done on an industrial basis, probably because of the quantity, resources and money.

Keywords; polyamide, polyester, recycling, recycling of blend materials, recycling of polyamide, recycling of polyester, separation methods, sustainability.

SAMMANFATTNING – POPULÄRVERSION

Idag konsumeras mycket textilier och naturen har inte en chans att återhämta sig i den takt som människor använder dess resurser.

I detta arbete beskrivs återvinning av de syntetiska textila filamenten polyester och polyamid. Återvinningsprocesser förklaras för polyester och polyamid som blandning men också som två separata material. Arbetet kartlägger även separationsmetoder vilka anses kunna användas för blandningen av filamenten. Information om polyesters och polyamids uppbyggnad och relevanta egenskaper beskrivs för att förstå hur de spelar en roll i återvinnings- respektive separationsprocesser. Arbetet lägger även stort fokus på hållbara frågor kring återvinning och konsumtionsbeteende.

För närvarande finns det metoder för att återvinna både polyamid och polyester som enskilda material. Dock är det svårare att återvinna filamenten som blandmaterial och få det till likvärdig kvalitet som innan.

Separationsmetoder finns tillgängliga idag men det behövs undersökas om det är fungerande tekniker för separation av polyester och polyamid. Det görs idag inte på industriell nivå troligen på grund av att det finns för liten mängd textil att bearbeta och att det kostar för mycket för företagen. Detta leder i sin tur till en dyr återvunnen filament i förhållande till priset på den jungfruliga.

FÖRORD

Denna studie är ett examensarbete på kandidatnivå, som genomförts i den avslutande delen av Textilingenjörsprogrammet, 180 hp, på Textilhögskolan i Borås. Från litteratursökningar, intervjuer och en laboration har information kunnat presenteras kring polyester och polyamid som material, polymerernas återvinningstekniker, återvinning av blandmaterial såväl som separationsmetoder. Därtill har kunskap erhållits för att förstå en del hållbara aspekter kring polyester, polyamid, konsumtion och återvinning.

Vi vill rikta ett tack till Eva Karlsson och Malin Wetterborg på Houdini Sportswear som engagerat oss och gett oss möjligheten att ta del av deras hållbarhetsresa och arbeta med detta projekt. Vi vill även tacka alla experter som varit oss behjälpliga under arbetets gång och bidragit med råd samt god informationsgrund. Ett stort tack till vår handledare, Lena Berglin, som väglett oss genom hela projektet och som alltid inspirerat oss med sin positiva inställning och sitt stora kunskapsförråd.

GÖTEBORG, 20 MAJ 2015

AMANDA JOHANSSON OCH HANNA LJUNGHOLM

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Sammanfattning	i
Abstract	ii
Sammanfattning – populärversion	iii
Förord	iv
Innehållsförteckning	v
1. Introduktion	7
1.1. Företagspresentation	7
1.2. Bakgrund	7
1.3. Problembeskrivning	8
1.4. Syfte	8
1.5. Forskningsfrågor	8
1.6. Avgränsningar	8
1.7. Begreppsförtydligande	8
1.8. Rapportupplägg	9
1.8.1. Informationsinsamling	9
1.8.2. Praktiskt arbete	9
1.8.3. Slutsats/Diskussion	9
2. Metod	10
2.1. Informationsinsamling	10
2.1.1. Informationssökning	10
2.1.2. Intervjuer	10
2.2. Praktiskt arbete	11
2.2.1. Förslag till praktiska experiment	11
2.2.2. Nedbrytning av polyamid med syra	11
3. Resultat	13
3.1. Informationsinsamling	13
3.1.1. Material	13
3.1.2. Polyamid	13

3.1.3.	Polyester.....	17
3.1.4.	Hållbara aspekter för polyamid och polyester.....	20
3.1.5.	Återvinning	24
3.1.6.	Separationsmetoder.....	30
4.	Praktiskt arbete	33
4.1.	Förslag till praktiska experiment.....	33
4.1.1.	Separertratt	33
4.1.2.	Elektrofores	34
4.1.3.	Acidolys	35
4.2.	Nedbrytning av polyamid med syra	35
5.	Diskussion/slutsats.....	37
5.1.	Återvinning av polyester respektive polyamid.....	37
5.2.	Polyester och polyamid som blandmaterial	37
5.3.	Separation av polyester och polyamid	37
5.4.	Råvara	38
5.5.	Material	38
5.6.	Miljömedvetenhet	38
5.7.	Ekonomi	39
5.8.	Avfallsdierktiv	39
5.9.	Återvinning	40
5.10.	Separation.....	40
5.11.	Praktiskt arbete.....	41
6.	Förslag till fortsatt arbete.....	42
7.	Referenser	43

1. INTRODUKTION

Detta examensarbete är en undersökning som berör möjligheter att återskapa textila filament av blandmaterialet polyester och polyamid. Det finns en del problematik kring att återvinna blandmaterial som bl.a. beror på att återvinningen är en komplicerad process. Detta är uppmärksammat av företaget Houdini Sportswear där intresset till att granska detta ämne kommer ifrån.

1.1. FÖRETAGSPRESENTATION

Houdini Sportswear är ett företag som skapar funktionsplagg för outdoor-branschen. Hållbar utveckling är centralt för Houdini Sportswear och det finns alltid ett engagemang att minska miljöpåverkan. En viktig aspekt för företaget är att deras plagg ska hålla länge och återvinning endast ska göras när ett plagg verkligen inte kan användas längre. Detta visas bl.a. i Houdini Sportswears butiker där det är möjligt att köpa deras produkter secondhand. (Houdini Sportswear u.å.) Genom att förlänga plaggets livslängd så långt som möjligt kan verksamheten bidra till att minska plaggets miljöpåverkan. (Houdini Sportswear u.å.; Mishra, Behera & Militky 2014; Slater 2009)

Wetterborg¹ berättar att Houdini Sportswear siktar på att bli 100 % cirkulära. Hösten 2015 var 56 % av deras produkter gjorda av återvunnet material och 73 % var återvinningsbara. Houdini Sportswear var först i Europa att ta del av återvinningsprogrammet Eco Circle som skapats av företaget Teijin Fibers. (Houdini Sportswear u.å.) Genom Teijin Fibers kan verksamheter få textilier av återvunnen polyester som bibehåller samma kvalitet som en jungfrulig polyesterfilament. Denna återvinnings teknik gör det möjligt att undvika skadliga restprodukter samt skapar en drastisk minskning på energiförbrukning och koldioxidutsläpp vid tillverkning jämfört med att utgå från jungfrulig polyesters råvara. (Tejin u.å.)

1.2. BAKGRUND

Begreppet överkonsumtion är kopplat till konceptet mode, och syftar på ständig efterfrågan på förändring i form av fortlöpande utbyte av produkter till något nytt. Så länge som konsumenter fortsätter köpa så kommer avfallet skapas, vilket bildar svårigheter angående vad som ska göras med slängda kläder och andra textila produkter. (Hawley 2010)

Dagens klädmarknad ser annorlunda ut jämfört med flera årtionden tillbaka. Inte bara utseendemässigt utan också vad gäller fiberinnehållet. Mängden avfall från textilier och textilproduktioner ökar varje år världen över. I endast Europa och Amerika beräknas i genomsnitt att cirka 10 miljoner ton textilavfall slängs årligen. Ekonomiska och miljömässiga aspekter gör det nödvändigt att försöka gå ifrån mängden avfall och generera alternativ som minskar miljöpåverkan. Idag är antalet återvunna textilier relativt låg och industrin bör integreras med denna teknik för att minska kvantiteten textil som slängs i deponier. (Hawley 2010)

¹ Malin Wetterborg materialassistent, mail den 26 maj 2015

1.3. PROBLEMBESKRIVNING

Syntetiska filament tar en stor plats i textilindustrin, däribland polyester och polyamid. (Albertsson, Edlund & Odelius 2009; Hawley 2010) Att återvinna material av 100 % polyester är idag möjligt genom Teijin Fibres återvinningsprogram (Houdini Sportswear u.å.), det finns även företag som utvecklat tekniker för att återvinna polyamid (Scheirs 1998). Wetterborg² berättar att några av de textilier som Houdini Sportswear använder sig av består av polyester och polyamid. Detta är ett tyg som används eftersom komfort kan kombineras med styrka och nöthållfasthet. Företaget anser att tyget är det mest hållbara och optimala materialet som företaget har hittat så här långt, och är en vanlig typ av blandning. Det finns därför ett engagemang från företagets sida att se huruvida dess återvinningsmöjligheter ser ut eftersom Houdini Sportswear alltid strävar efter att inte kompromissa kvalitet med miljö.

1.4. SYFTE

Syftet med denna rapport är att undersöka om det går att återskapa ett nytt filament av återvunnet blandmaterial bestående av polyester och polyamid med en minst lika bra prestanda som en icke återvunnen.

1.5. FORSKNINGSPRÅGOR

- Hur fungerar återvinning av polyester respektive polyamid?
- Kan polyester och polyamid återvinnas som blandmaterial?
- Går det att separera polyamid och polyester?
- Vad har polyester och/respektive polyamid för påverkan på miljön?

1.6. AVGRÄNSNINGAR

I utförd laboration testas ett blandmaterial av 50 % polyester, 40 % polyamid och 10 % elastan som Houdini Sportswear använder sig av i en del av sina produkter. Elastan är en felfaktor i försöket.

1.7. BEGREPPSFÖRTYDLIGANDE

- Nylon och polyamid är olika begrepp för samma material i denna rapport. Båda namnen syftar till typen polyamid/nylon 6.
- Polyestern som berörs i detta arbete är polyetentereftalat (PET). Materialet kan både komma att kallas för polyester respektive polyetentereftalat (PET).
- Jungfruligt material innebär att polyestern eller polyamiden är framställd från ny råvara, d.v.s. är inte återvunnen.
- Ordet filament syftar på ett textilt material som kan framställas utan en begränsad längd från skillnad till textila fibrer. Syntetiska material såsom polyester och polyamid spinns ut till filament i dess tillverkningsprocess. Därför presenteras dessa material som filament även om de kan kortas ner till fibrer efter spinnprocessen. Dock kvarstår i vissa fall termen fiber när generella metoder för textilier beskrivs.

² Malin Wetterborg materialassistent, telefonsamtal den 9 maj 2015

1.8.RAPPORTUPPLÄGG

Nedan presenteras tre delar i rapporten för att ge en övergripande bild av hur arbetet presenteras. Dessa introduceras i rubrikerna nedan.

1.8.1. INFORMATIONSSINSAMLING

Största delen av rapporten är uppbyggd genom en informationsinsamling. I detta avsnitt presenteras polyamid och polyester som material och hållbarhetsaspekter för polymererna, vilka är viktiga för att till viss del förstå varför material återvinns och vad det finns för intresse kring ämnet. Information från litteratur och intervjuer kring återvinning av polyester respektive polyamid, återvinning av blandmaterial såväl som separationstekniker presenteras även i denna del, vilken ligger till grund för den praktiska delen.

1.8.2. PRAKTISKT ARBETE

I den praktiska delen presenteras olika förslag för praktiska experiment för att separera blandmaterial. Denna har fått sin grund genom informationsinsamlingen och intervjuer med kompetenta personer inom området. Dessutom redogörs en utförd laboration med syra för att vidare testa om ett av förslagen fungerar för polyester och polyamid.

1.8.3. SLUTSATS/DISKUSSION

För att ge läsaren mer överskådliga svar på de forskningsfrågor som ligger till grund för arbetet ordnas dessa i kortfattade förklaringar. Tillsammans med detta presenteras en diskussionen som grundar sig på det fakta som tagits fram under litteraturstudien, under intervjuer och kring egna funderingar.

2. METOD

Undersökningen som tagits fram har gjorts genom två olika metoder. En teoretisk del där relevant information kring ämnet inhämtats och en mer praktisk del där bland annat ett experiment har genomförts. Därför är denna rapport indelad i två avsnitt där den teoretiska delen ligger som grund för det praktiska arbetet.

2.1. INFORMATIONSSAMLING

I denna rapport har det framför allt fokuserats på fyra stora delar. Dessa är polyester och polyamid som material, några av dess hållbarhets aspekter, hur de återvinns som homogena material respektive som blandmaterial, samt vad det finns för olika separationsmetoder.

I början av arbetet inriktades det framför allt på polyester och polyamid som material för att få en förståelse för dess uppbyggnad och olika egenskaper. Detta i vidare syfte att få en uppfattning om varför blandmaterialet används samt för att bättre kunna förstå hur de fungerar i återvinning och separeringsprocesser.

Efter materialen introducerats var det intressant att se hur dessa återvinns. Dels separat men också som blandmaterial. När det inte kunde hittas stöd för att kompositmaterial återvinns ihop i en process lades större fokus på separeringsmetoder för att vidare kunna återvinna fibrerna som enhetliga material.

I syfte att få en god grund över hur polyamid och polyesters påverkar hållbara frågor söktes litteraturer kring ämnet. Dessa sökningar gav många frågor att diskutera vidare såsom återvinningen som dold miljöbov, syntetfibrers miljöpåverkan, samt miljömedvetenhet i samhället.

2.1.1. INFORMATIONSSÖKNING

Litteraturen i denna rapport har erhållits genom tryckta böcker eller internetbaserad information. Den tryckta litteraturen har lånats från bibliotek på Högskolan i Borås eller Göteborgs stadsbibliotek. Även tidigare kurslitteratur har använts som tryckt källa. Internetbaserad information har inhämtats från databaser som finns tillgängliga via Högskolan i Borås samt Google Scholar, Woodhead publishing och Google. Vetenskapliga artiklar, relevant litteratur samt information från hemsidor nyttjas för att få så bred fakta som möjligt. Det tas hänsyn till att företagshemsidor kan vara partiska och ge missledande information. Trots detta används några sådana för en allmän information inom valt ämne.

2.1.2. INTERVJUER

Innan start och kontinuerligt igenom arbetet hålls en kontakt med handledare från Houdini Sportswear och Textilhögskolan i Borås för att erhålla viktig information och för att utbyta tankar kring hur arbetsprocessen fortlöper. För att erhålla mer fakta kring polymererna, återvinning och separationsmetoder har ett flertal personer med särskild kompetens inom relevanta områden intervjuats genom möten, telefonsamtal och mejl. Dessa personer introduceras i rapporten och placeras som fotnoter.

2.2. PRAKTISKT ARBETE

Förslag på olika metoder har studerats för att hitta alternativa vägar att separera blandmaterial av polyamid och polyester. Ett av dessa experiment har utförts i form av en laboration där syra används för att bryta ned polyamiden och på så sätt skilja polyamidfilamentet från polyestern.

2.2.1. FÖRSLAG TILL PRAKTISKA EXPERIMENT

Genom informationsinsamlingen och intervjuer tas olika förslag fram som tros kunna användas för att separera ett blandmaterial av polyester och polyamid. Separeringsförslagen är byggda på att kunna tillämpas på en mindre skala i ett laboratorium för att förhoppningsvis skapa en grund som stegvis ska kunna utvecklas till en större kvantitet.

2.2.2. NEDBRYTNING AV POLYAMID MED SYRA

Material och metod i detta test demonstreras enligt text, bild och tabell nedan.

Material till samtliga test

- Dragskåp
- Våg (0,1 mg noggrannhet)
- Pipett 10 ml
- Pincett
- Glasstav
- Glasbägare 400 ml
- Röd: polyestertråd (dtex 150-300)
- Grön: polyamidtråd (dtex 78/2-110/2)



FIGUR 1 PROV I EXPERIMENT BESTÅENDE AV EN POLYAMID- RESPEKTIVE POLYESTERTRÅD

Vardera tråden klipps till en längd på ca 16 cm och vägs. En polyamid- respektive polyestertråd tvinnas samman (se figur 1) och detta är provet i testet. Efter detta mäts kemikalier upp och en av dessa späds i vatten. Vilken sorts lösning och dess mängd, trådarnas vikt samt om syran spädes ut med vatten demonstreras i tabell 1.

Prov nr	Lösning	Mängd lösning (ml)	Vikt PET-tråd (Röd) (g)	Vikt PA-tråd (Grön) (g)	Andel H ₂ O 21°C (ml)
1	Myrsyra 85 %	2	0,0038	0,0036	-
2	Svavelsyra 95 %	2	0,0037	0,0038	6
3	Ättiksyra 24 %	2	0,0037	0,0039	-

TABELL 1 EXPERIMENTETS LÖSNINGAR, MÄNGD LÖSNING, VIKT HOS POLYESTER- OCH POLYAMIDTRÅD SAMT ANDEL VATTEN.

När ett prov släpps i lösningen påbörjas en tidtagning som avslutas när provet antingen synligt anses ha fått sin polyamidtråd upplöst eller när det inte verkar som att

provet reagerar alls. Samtliga tester sker under omröring. När ett prov anses färdigt plockas det upp med pincetten från vätskan, spolats med vatten och torkas i värme-skåp på 50°C. Dessa prover vägs därefter för att bedöma om polyamidens vikt försvunnit ur blandningen.

Test av tyg från Houdini Sportswear

Efter en bedömning av resultatet från tidigare laboration (se tabell 2, s.35) görs ett test med ett blandmaterial bestående av 50 % polyester, 40 % polyamid och 10 % elastan tillsammans med myrsyra (85 %). Tygets vikt är 0,3290 g och mängden myrsyra är 9 ml. Precis som för tidigare nämnd laboration rörs provet om efter det släppts i lösningen. Tiden som provet får ligga i syran är 5:00 min. Tyget tas därefter upp med pincett, sköljs med vatten och torkas i torkskåp på 50°C. Denna tygbit vägs sedan för att skapa en uppfattning om hur stor procentdel av tyget som försvunnit.

3. RESULTAT

I resultatkapitlet presenteras den teori och fakta som tagits fram genom informationsinsamling. Därtill presenteras olika förslag på praktiska laborationer som bygger på separering av material innehållande olika komponenter. Resultatet av den laboration som genomförs i detta arbete beskrivs även här.

3.1. INFORMATIONSINSAMLING

I detta avsnitt presenteras relevant fakta kring polyamid och polyester som enskilda material, allmän information kring konsumtion, avfallshantering och hållbarhetsaspekter. Detta ligger som bakgrund till två större delar där återvinnings- och separationstekniker redogörs.

3.1.1. MATERIAL

I början av 1900-talet introducerades de första syntetiska filamenten. (Albertsson, Edlund & Odelius 2009). Kemister kunde se att ull och silke var uppbyggt med proteinstruktur vars polymer innehöll peptidbindningen (CONH). Det är den här teorin som ligger till grund för utvecklingen av den första syntetiska filamentet, polyamid, men istället för att använda aminosyror (som protein är uppbyggt av) brukades vid ett experiment istället en diamin och en dikarboxylsyra. (Kadolph 2006) Polyamid och polyester framställs vanligtvis från petroleum (Bäckström u.å.; Ozen, Kiziltas, Kiziltas & Gardner 2013; Sharma & Kundu 2006; Slater 2009) som är ett fossilt bränsle som förekommer i delar av berggrunden. (Daly 1994)

Den mest kommersiellt erkända polyestern är polyetentereftalat (Albertsson, Edlund & Odelius 2009; Gohl & Vilensky 1991). Tack vare polyamidens och polyesterns unika egenskaper blev materialen en succé när dem ut på marknaden (Hatch 1993). Polyestern den vanligaste och mest använda syntetiska materialet (Albertsson, Edlund & Odelius 2009) och materialet har en större produktionsvolym än bomull (Aizenshtein 2009; Bergner 2013).

Polyamid respektive polyester introduceras i varsin rubrik. För båda materialen presenteras polymerernas uppbyggnad, egenskaper samt hur de kan tillverkas. De olika egenskaperna som beskrivs är dels utvalda för att kunna bedöma dess komfort och slitstyrka (elasticitet, tøjning, absorptionsförmåga, slitstyrka och nötbeständighet) vilket är viktigt för Houdini Sportswear. Därtill läggs stor fokus på olika faktorer som visat sig vara väsentliga för återvinningsprocesser eller separationsmetoder, såsom densitet, vikt, polaritet, termiska egenskaper och kemikalieresistens.

3.1.2. POLYAMID

I denna redogörelse läggs störst fokus på polyamid 6 då denna typ av polyamid är en vanlig typ av filament som används inom konversilla klädtextilier. Nedan beskrivs denna filaments tillverkning, kemiska uppbyggnad och dess egenskaper.

Tillverkning och kemisk struktur

Polyamidfilamentet är en termoplast som tillverkas genom stegvis polymerisation (Albertsson, Edlund & Odelius 2009). Det finns möjlighet att framställa polyamidfilamentet i två olika styrkor, så kallad vanlig styrka för kläindustri och hög styrka för industriella- och mattindustrin. Därtill är det möjligt att modifiera dess tvärsnitt,

vilket bland annat kan ge olika lyster, skapa olika mjukhet och gör att filamenten kan hålla formen olika bra. (Hatch 1993) Materialet kan även krimpas eller textureras (Gohl & Vilensky 1991)

Vid tillverkning av polyamid används en trycktank av rostfritt stål där polymerisationen får äga rum. Detta för att kunna skapa en egen atmosfärisk miljö utan syre som kan påverka polymeren negativt. När monomererna kopplar till varandras ändar avges vattenmolekyler, vilka tas bort ifrån tanken. När polymerisationen ägt rum förs materialet ut igenom en springa i tanken som en trögflytande massa som sedan kyls ned och delas upp till granulat. (Hatch 1993)

Polyamid är en typ av syntetfilament som består av linjära polymerkedjor (Hatch 1993) och är uppskattningsvis 65-85% kristallin och 15-35% amorf (Gohl & Vilensky 1991). Polymeren kallas för polyamid eftersom dess huvudkedja binds samman av flera amidmolekyler. En amid är produkten av en reaktion mellan en karboxylsyra och en amin. De amidbindningar som bildas i polyamiden är samma som finns i naturliga proteinfibrer vilket indikerar på polyamidens inspirationskälla. (Hatch 1993) Mellan amidgrupperna i kedjorna i polyamiden kan vätebindning bildas vilket resulterar i en generellt bättre sammanhållning i kedjorna jämfört med polyester. (Albertsson, Edlund & Odelius 2009)

Polymerisationsgraden för polyamid 6 är cirka 200 och ger en längd på ungefär 90 nm och en tjocklek på 0,3 nm. Den viktigaste kemiska gruppen i polyamid är den polära amid-gruppen eftersom den gör att polymererna binds till varandra (Gohl & Vilensky 1991). Mellan amidgrupperna finns alifatiska eller aromatiska segment av varierande längd (Albertsson, Edlund & Odelius 2009). Den polära amidgruppen består av gruppen $-CO-NH-$, där syre får en negativ laddningsförskjutning och väte för en positiv laddningsförskjutning. Därför kommer syreatomen vilja binda till något positivt och vätet kommer dra sig till något negativt. På så sätt kan polymererna bindas genom att deras dessa atomer attraherar varandra och bildar en vätebindning. Den andra viktiga gruppen är amino-gruppen NH_2 som sitter på änden av polymeren (Gohl & Vilensky 1991).

För nylon 6 är utgångsmaterialet caprolactam vilket används vid polymerisationen. Caprolactam, som är en ring-förening, öppnar sig och reagerar med andra upp-öppnade ringar av caprolactam. Det går att variera antalet kolatomer i den repeterande enheten vilket kan ge polyamiden väldigt olika egenskaper. (Deopura 2008)

Egenskaper

De egenskaperna för filamentet som valts ut är till för att ge information som kan avgöra textiliens komfort och slitstyrka samt för att se över polyamidens möjligheter att återvinnas eller separeras.

Slitstyrka och nöthärdighet

Polyamid är ett mycket starkt filament med hög slitstyrka (Bergner 2013). Den är den starkaste konventionella filamentet vilket bland annat är tack vare dess rutnäta av mycket starka sekundära vätebindningar samt dess kristallina polymerstruktur. (Gohl & Vilensky 1991) Detta gör polyamidfilament till ett starkare material än ståltråd. (Hatch 1993) Dock resulterar dess vätebindningar till att materialet tappar dess

styrka när den blir blöt eftersom vattenmolekylerna kan dra sig till de amorfa områdena och hydrolysera (bryta upp) bindingarna (Gohl & Vilensky 1991).

Polyamid har en mycket god nötningsbeständighet (Bergner 2013). Allmänt anses filamentet ha den bästa nötbeständigheten (Hu 2008). Den kan motstå en enorm mängd krafter ifrån exempelvis gnuggning, böjning, skrapning utan att gå sönder. Det är vanligt att polyamid används i blandningar som en förstärkning. Dock är det viktigt att blandgarn där stapelfiber av polyamid ingår blandas ordentligt på grund av att polyamid självt är som ett slipmaterial och kan då riskera att skada den andra fibern i blandningen genom att gnida mot den. (Hatch 1993)

Absorptionsförmåga och polaritet

Polyamidfilamentet har en viss fuktupptagningsförmåga. Den absorbera mindre fukt än naturfibrer men har en högre absorptionsförmåga än många andra syntetiska filament, till exempel polyester. (Bergner 2013) Detta beror på att polyamidens polära amidgrupper drar till sig vattenmolekyler. Amidgrupperna ligger på filamentytan på grund av det väldigt kristallina polymersystemet. (Hatch 1993)

Vid sportartiklar är det att föredra att använda sig av ett material som har låg absorptionsförmåga för att få en bättre komfortupplevelse. Fukten från svett kan med ett material som har låg absorptionsförmåga transporteras bort längs med filamentet. Vid en högre absorptionsförmåga sugs fukten upp och kläderna upplevs då som blöta. (Humphries 2009) Dock kan en för låg absorptionsförmåga lätt leda till en statisk elektricitet i textilen (Gohl & Vilensky 1991).

Elasticitet och töjning

Polyamidfilamentet påminner om människans muskelmöjligheter. Materialet kan förlängas och återgå till sin ursprungsform och är uthållig vid strak påfrestning. Denna kombination av hållfasthet och dess sällsynta ihärdighet och återhämtningsförmåga gör polyamidfilamentet unik bland de textila materialen. (McIntyre 2005) Vanligen gäller att högkristallina material som är sammansatta med straka intermolekylära bindningar har låg elasticitet/töjning, detta berör emellertid inte polyamidfilamentet. När polyamidfilamentet utsätts för en längsgående kraft, vilken är större än styrkan hos vätebindningarna, är det polymerens zig zag struktur som rätas ut och på så sätt kan polyamiden töjas. Vidare gäller att polyamidens polymerer bildar ett gallermonster av vätebindningar och på så sätt förhindras glidning av polymerer i förhållande till varandra. När den längsgående kraften tas bort återgår polymeren till sin zig zag konfiguration (hur en molekyl är uppbyggd på atomnivå) och får sin originalposition. (Hatch 1993, Tingsvik 2009)

Densitet och vikt

Polyamidfilamentet har relativt låg vikt vilket ger materialet lättviktiga egenskaper (Kadolph 2006; Bergner 2013). Densiteten för polymerens filament beräknas vara mellan 1-1.24 g/cm³ (Albertsson, Edlund & Odelius 2009; Gohl & Vilensky 1991). Denna lättvikta egenskap i kombination med dess höga seghet/styrka gör polyamiden unik. (Hatch 1993; Kadolph 2006; Bergner 2013)

Kemikalieresistens och termiska egenskaper

Polyamider är känsliga mot starka syror (Albertsson, Edlund & Odelius 2009) (Gohl & Vilensky 1991) och något tåligare mot alkalier. Amidgrupperna i polyamiden blir lätt hydrolyserade under syrliga förhållanden och gör att dess interpolymera vätebindningar bryts upp. Vid kontinuerliga och långvariga alkaliexponeringar kan polyamid också bli hydrolyserad. Båda hydrolyserna gör att materialet blir svagare och gulnar. (Gohl & Vilensky 1991)

Polymerens sammanhållning genom dess vätebindningar leder även ofta till att polyamider har ett högre T_m och T_g och är starkare än motsvarande polyestrar. Smälttemperaturen ligger mellan 180-285°C och glasöversiktstemperaturen är mellan 30-90°C. (Albertsson, Edlund & Odelius 2009)

Under denna rubrik ges en inblick över polyester. Framför allt berörs materialet polyetentereftalat (PET) eftersom denna är den vanligaste varianten av polyester och påfinns troligen i Houdini Sportswears blandmaterial. Liksom för polyamid delas informationen upp i en tillverknings-, uppbyggnads- och egenskapsdel.

Tillverkning och kemisk struktur

Polyester tillverkas liksom polyamid genom stegvis polymerisation, och är den kommersiellt vanligaste syntetiska filamentet som framställs på detta sätt. (Albertsson, Edlund & Odelius 2009) Den vanligaste processen vid framtagning av PET bygger på en omförestring där polymeren skapas genom att metylestern av terefalatsyran reagerar med etylenglykol (Albertsson, Edlund & Odelius 2009; Hatch, 1993) För att kunna klassificeras som en polyester behöver polymeren ha ett esterinnehåll på minst 85 % (Hatch 1993). Alkoholen behöver avlägsnas från reaktionsblandningen för att nå hög omsättning och hög molekylvikt. Detta på grund av att omförestringen är en omvändbar process, det vill säga en jämviktsreaktion. (Albertsson, Edlund & Odelius 2009)

Polyesterns molekylära kedjor är linjära och högorienterade. Ordet ester kommer från när salter skapas genom en reaktion mellan en alkohol och en syra. Liksom polyamid har polyester en kristallinitet på 65-85 % och en amorfhet på 35-15 %, men till skillnad från polyamid har polyester mycket få vätebindningar. (Gohl & Vilensky 1991; Hatch 1993) Detta beror på att kedjan inte är speciellt polär och gör att det istället är övervägande Van der Waals bindningar som attraherar polymersystemet. För att dessa bindningar ska vara effektiva måste det finnas utomordentlig orientering, vilket påfinns i polyesterns kristallina system. (Gohl & Vilensky 1991)

Polyester är en typ av polymer som framställs som både hårdplast och termoplast, och det är den termoplastiska varianten som används för att producera syntetfilament (Bergner 2013). Polyesterns filament är jämna och translucenta, i likhet med polyamid (Albertsson, Edlund & Odelius 2009; Gohl & Vilensky 1991; Hatch 1993) Filamentdiametern för polymeren är mellan 12 μm och 25 μm beroende på deras slutliga tillämpning. Materialet har ingen identifierbar mikroskopiskt utseende på grund av dess regelbundna yttre och nära cirkulära tvärsnitt. (Gohl & Vilensky 1991; Hatch 1993) Ofta blir framställda filamenten, också i likhet med polyamid, krimpade eller texturerade (Gohl & Vilensky 1991).

Polymerisationsgraden för polyetentereftalat sträcker sig från runt 115 till 140 (Gohl & Vilensky 1991; Hatch 1993). Den ger en tjocklek på runt 0,6 nm och en längd på cirka 120-150 nm, vilket är något längre och tjockare än polyamid. (Gohl & Vilensky 1991). De viktiga kemiska grupperna i polyesterpolymeren är metylen- ($-\text{CH}_2-$), karbonyl- ($-\text{CO}-$) och estergrupperna ($-\text{OCO}-$). (Gohl & Vilensky 1991; Hatch 1993) Det är endast karbonyl-grupperna som skapar en någorlunda polaritet och därför är det huvudsakligen Van der Waals bindningar som håller ihop polymeren. (Gohl & Vilensky 1991) Karboxylsyran i en polyester behöver vara en aromatisk typ av syra, vilket innebär att det finns en bensenring i strukturen. Denna är också en betydelsefull kemisk grupp i polyesterns uppbyggnad. (Hatch 1993)

Egenskaper

För samma syfte som för polyamid väljs egenskaperna ut för att kunna förstå dess komfort, slitstyrka, återvinnings- respektive separationsmöjligheter.

Slitstyrka och nötbeständighet

Tack vare polyesterns extremt kristallina polymersystem blir dess filament väldigt starka och har god resiliens. De svaga vätebindningarna tillsammans med effektiva Van der Waals bindningar resulterar till mycket god fasthet, som även håller i blött tillstånd. (Gohl & Vilensky 1991; Hatch 1993)

Polyesterns kristallinet bidrar även till att polymeren får en stelhet och ger inte efter när filamenten böjs. Detta ligger även som grund för polyestermaterials skrynkelhårdighet. (Gohl & Vilensky 1991; Hatch 1993) Polyester kommer på andra plats efter polyamid när det gäller nötbeständighet (Hu 2008).

Absorptionsförmåga och polaritet

Polyesterfilamentet kännetecknas av dess låga fuktabsorption, vilket gör materialet till en god fuktransporterare (Hatch 1993). Polyester är hydrofobiskt till följd av att dess kristallina struktur och icke-polaritet som hindrar vattenmolekyler från att ta sig in i polymeren. (Albertsson, Edlund & Odellius 2009; Gohl & Vilensky 1991) Den mycket lilla mängd vatten som kan påfinnas i polyestermaterial uppträder på dess yta i form av en molekylär film (Gohl & Vilensky 1991).

De hydrofobiska egenskaperna gör att fetter och oljor dras till polymeren, vilket skapar problematik vid tvätt. Dess hydrofobiska egenskaper tillsammans med dess attraktion för oljor gör det nästan omöjligt att få bort fetter från smutsiga polyester-material. Polyester kan ackumulera statisk elektricitet (Hatch 1993; Gohl & Vilensky 1991), vilket bland annat gör att polyestern gärna drar åt sig luftburna smutspartiklar. Detta problem finns inte i samma utsträckning för polyamid eftersom det är mer hydrofilt och drar inte frivilligt åt sig oljiga smutsar. (Gohl & Vilensky 1991)

Elasticitet och töjning

Polyester, från skillnad till polyamid, klarar inte av stor mängd stretching eller tryck eftersom dess bindningar har en tendens att slira. (Gohl & Vilensky 1991; Hatch 1993) Detta resulterar till att filamentet inte kan återhämta sig särskilt bra efter den utsätts för påfrestning. Varje töjning mer än 2 % kan skapa en deformation (Hatch 1993)

Densitet och vikt

Textila polyester-material framställs i form av filament med en densitet på cirka 1,40 g/cm³ (Albertsson, Edlund & Odellius 2009; Gohl & Vilensky 1991). Polymeren räknas som en filament av medium-vikt, men jämfört med polyamid är polyestern ganska tung. Därför görs polyester-materialen relativt tunna för att tjocka polyester-material bli för tunga. (Gohl & Vilensky 1991) Materialet är även känt för att kunna blandas med andra typer av fibrer såsom bomull, ull eller rayon (Hatch 1993).

Kemikalieresistens och termiska egenskaper

På grund av polyesterns hydrofoba egenskaper är polymeren resistent mot många kemikalier. Polyesterns estergrupper, men även andra kemiska grupper i dess struktur, är resistent mot syrahydrolys. Motståndskraften genereras även av polymerens

kristallinitet som förhindrar syra eller vatten att tränga sig in i dess uppbyggnad. Från skillnad till syra kan alkaliförhållanden under tvätt skapa en hydrolys vid polyesterns estergrupper. Dock begränsar polymerens kristallinet hydrolysen till ytan, vilket gör polymeren förlorar en del av sitt ytskikt vid varje tvättning. (Gohl & Vilensky 1991)

Polyestern är en termoplastisk polymer med en smältpunkt på approximativ 260°C och kan klara av temperaturer upp till 175 °C innan dess beteendet börjar ändras (Albertsson, Edlund & Odelius 2009) Polyester kan behålla värmefixering permanent till skillnad från vissa andra termoplaster. (Gohl & Vilensky 1991)

3.1.4. *HÅLLBARA ASPEKTER FÖR POLYAMID OCH POLYESTER*

Denna del i rapporten är presenterad i syfte att ge läsaren en viss förståelse för allmänt konsumtionsbeteende, företagsintresse för återvinning, samt en del av de problem som finns med syntetiska textilier med fokus på polyester och polyamid. Miljömedvetenhet, fossila resurser, polymerernas produktion, ekonomiska faktorer och avfallsdirektiv presenteras.

Miljömedvetenhet

Den världsomfattande årsproduktionen av natur, regenat och syntet textilier har ökat 5 gånger på 10 år. (Turtle, Horne, Blackburn, Stott, Laybourn, Copeland & Harwood 2009) År 2010 konsumerades 132 000 ton textil i Sverige varav nästan 60 % var av syntetiska material (Palm, Harris & Ekvall 2013). Detta blir ett genomsnitt på 15 kilo kläder och textilier per år per person, därav går ca hälften till förbränning när de är uttjänta och endast tre kilo återanvänds. (Naturvårdsverket 2013)

Textil är ett material som består av fibrer eller filament och är en komplex produkt som kräver mycket energi, naturresurser, kemikalier och arbetsinsatser för att framställa. På senare år har intresset för textila materials påverkan på miljön ökat. Detta beror bland annat på att det idag finns en större miljömedvetenhet än vad det funnits tidigare samt att det finns en oro inom kläd- och modebranschen för ökade råvarupriser och minskad tillgång av resurser för att tillverka nya material. Det finns även en ökad efterfrågan av fibrer och textila material vilket är ett resultat av den globala befolkningstillväxten och allmän förbättring av levnadsstandard. (Personne & Sundin 2013; Wang 2006)

Fossila resurser

Polyester och polyamid framställs främst utav råvaran petroleum (Bäckström u.å.; Ozen, Kiziltas, Kiziltas & Gardner 2013; Sharma & Kundu 2006; Slater 2009) som genomgår en 100 000-årlig process för att bildas. Många forskare menar på att utvinnandet av materialet består till mer än 99 procent av den takt som nybildandet av petroleum sker. (Wang 2006; Wikipedia 2015) Idag behövs bättre omhändertagande av de ändliga resurser som används, så som kol och olja eftersom det kommer att bli en bristvara i framtiden. (Persone & Sundin 2013)

Petroleum har en omfattande framställning genom högenergikrävande bormaskiner som genererar avfall och skadliga utsläpp under transport. (Daly 1994; Slater 2009) När oljan väl är samlad så krävs energi i form av värme för att separera materialet i beståndsdelar. Efter detta omvandlas den lämpliga beståndsdelan genom en kemisk reaktion med hjälp av värme för att skapa en polymer som kan användas för produktion. Denna process behöver stora mängder energi och genererar avfall i form av gas och flytande eller fasta biprodukter. (Slater 2009)

Produktion

Vid textilproduktion skapas en stor del koldioxidutsläpp (Persone & Sundin 2013). Vid polyamidtillverkning frigörs dessutom kväveoxid, vilken är mer skadlig än koldioxid och påverkar också växthuseffekten (Slater 2009). Vid polyesterproduktionen kan 1,4-dioxan bli en biprodukt. Denna vätska påstås vara cancerframkallande för

människor, vilket tyder på att det är viktigt att fokusera på att utveckla reningsprocesser vid framställning av filamentet (Slater 2009) Även polyamidtillverkningen kan påverka människan genom att framkalla lungskador på grund av att det frigörs kväveoxid vid denna process (Meulenbelt 2012).

Ett miljömässigt problem med polyester och polyamid sker genom spinning och extrudering. För smältspinning krävs t.ex. komplexa och energikrävande maskiner och vid extruderingen kan nedbrytning av polymeren ske vid felaktiga temperaturregleringar och på så sett orsaka restprodukter. (Slater 2009)

Ekonomi

Den huvudsakligen anledningen till varför textilier inte återvinns är relaterade till ekonomiska faktorer, vilket gör att företag väljer andra varianter av avfallshantering (Wang 2006). Ekonomiska faktorer som spelar in på textilindustrin beror bland annat på materialtillgänglighet och de rådande råvarupriserna. (Hawley 2010) Syntetmaterial kan som tidigare nämnt vara baserat på olja, och råvarans pris samt dess energikostnad för produktion varierar, vilket i sin tur påverkar materialpriset. (Hansen & Atwood 2005; Magruder 2009) För verksamheter som har intresse av att köpa in återvunnen polyester från exempelvis Eco Circle ligger inköpspriset ca 20-30 % över priset för jungfrulig polyester och marknadspriset för återvunnen polyamid är ca 25 % högre jämfört med polyamid framställd från ny råvara. (Mowbray 2009; Scheirs 1998) Anledningar till att priserna för återvunnet material är högre än textilier från ny råvara kan beror på att efterfrågan inte är tillräckligt hög (Hansen & Atwood 2005; Magruder 2009), återvunna material ger ofta en lägre vinstmarginal i förhållande till jungfruliga på grund av en försämrad kvalitet (Sartorius & Krähling 2012).

För att skapa en ändring för andelen företag som är villiga att använda sig av återvinningsindustrin menar Wang (2006) att det behövs en förändring av lagstiftningen som vänder på kostnadsproblematiken och istället göra det förmånligt att återvinna (Wang 2006). I framtiden skulle en större efterfrågan och fler aktörer gynna företag som vill integrera med återvinnig eftersom det skulle bli mer lönsamt att investera i återvunna material. (Hansen & Atwood 2005; Magruder 2009)

Enligt Torstar³ och Åkesson⁴ kan en återvinningsindustri i sig vara svårt att skapa. En återvinningsprocess kan kräva femtio processteg. Varje process är kostsam i sig relaterat till resurser, energi och tid. Dessutom kan avancerade tekniker kräva olika tillsatser, vilket kan vara en relevant investeringsfråga för företagen. Ett exempel på detta är en återvinningsprocess som kallas för pyrolysis, vilken beskrivs i avsnitt ”Återvinning” s.27. Denna process kräver en stor anläggning, vilket skapar ett logistikproblem. Dessutom behöver anläggningen tillräckligt stora materialvolymen för att skapa en gynnsam verksamhet.

³ Dan Åkesson Universitetslektor Institutionen Ingenjörshögskolan, muntlig intervju den 18 maj 2015

⁴ Sandra Tostar Kemi och kemiteknik, Industri Materialåtervinning Chalmers Tekniska Högskola AB, muntlig intervju den 18 maj 2015

Avfallsdirektiv

År 2008 beslutade EU att införa nya avfallsdirektiv som ersättning för tre gamla direktiv angående avfall, farligt avfall och spillolja. Sverige införde år 2011 dessa avfallsdirektiv i svensk lagstiftning. Avfallshierarkin, även kallad avfallstrappan, är en del av avfallsdirektiven och är en ordning över hur avfall ska omhändertas. Avfallstrappan utgör utgångspunkten bland direktiven. (Lindqvist 2014)

Trappan består av 5 följande trappsteg:

1. Förebyggande: Avfallsminimering ligger som första prioritet vilket innebär att förebygga eller förhindra att avfall skapas. Detta innebär att i första hand försöka att det skapas så lite avfall som möjligt. Detta är det bästa sättet för att minimera användningen av jordens resurser och påverkan på miljön, d.v.s. vidta åtgärder innan ett ämne, ett material eller en produkt blir till avfall.
2. Återanvändning: Förbereda för att återanvända det avfall som faktiskt finns. Kontrollera, rengör eller reparera redan befintliga produkter som blivit till avfall för återanvändning utan att någon annan förbehandling behöver göras. Detta kan göras genom att t.ex. skänka eller lämna in till second hand.
3. Materialåtervinning: Återvinna materialet när återanvändning inte är möjligt. All form av återvinning där produkter, material eller ämnen upparbetas antingen för det ursprungliga ändamålet eller för andra ändamål. Det måste vara en uppabetning av organiskt material alltså inte energiåtervinning eller material till bränsle och fyllmaterial.
4. Annan återvinning, till exempel energiåtervinning: Utvinna energin i avfallet genom förbränning om materialåtervinning inte är möjligt.
5. Bortskaffande: Till sist ska deponering väljas som alternativ. Förbränning, utsläpp till vatten och deponi räknas till bortskaffande.

(Lindqvist 2014; Jönsson u.å.; Europaparlamentet och europeiska unionens råd 2008)

Återanvändning, som ligger på plats nummer två i trappan, fodras som alternativ före fiberåtervinning. Återvinning är en bra lösning, men det finns utmaningar med processen. Det krävs en mekanisk, kemisk eller biologisk bearbetning av fibrerna för att återvinna materialet. Dessa fordrar i sin tur viss mängd energi och eventuellt ytterligare råmaterial måste adderas till det återvunna materialet för att uppnå en viss kvalitet.⁵ Detta genererar, precis som vid nytillverkning avfallsutsläpp i luft, vatten och marker. En återvinningsprocess kan därför riskera att använda mer petroleum än vad det sparar och generera större skada på miljön genom utsläpp. (Wang 2006)

För syntetisk textil finns det tydliga miljövinster med att välja materialåtervinning framför energiåtervinning. Detta för att spara på jordens materialresurser samt att det

⁵ Sandra Tostar Kemi och kemiteknik, Industri Materialåtervinning Chalmers Tekniska Högskola AB, muntlig intervju den 18 maj 2015

går åt mindre energi för att återvinna ett material än att tillverka ett nytt. (Personne & Sundin 2013)

Deponering är den sista utväg som ska tas till åtgärd enligt avfallstrappan. Det är en kostsam metod som slösar med både energi och materialresurser. Emellertid är detta en stor dominerande metod för avfall i världen, bl.a. en vanlig väg att gå i USA. (Wang 2006)

Det är ett växande problem för textilindustrin att hantera de miljontals ton avfall som tillverkas varje år i form av kläder eller andra textilier. Dessa måste hanteras för att skapa ett hållbart ekosystem. (Mishra, Behera & Militky 2014) Detta leder till att återvinningen har blivit mer attraktiv på marknaden och mycket forskning bedrivs inom detta område. (Personne & Sundin 2013; Wang 2006; Cho & Kim 2015; Up-sani, Jain, Save, Agarwal & Kelkar 2012)

Med utgångspunkt från betydande information om polyester och polyamid som material, vissa hållbarhetsaspekter och ett allmänt intresse kring återvinning presenteras ett kapitel som berör återvinning av homogena material, återvinning av blandmaterial och jämförelser mellan återvunnet, icke återvunnet, blandmaterial och enhetligt material.

Återvinning av homogena material

Det finns idag etablerade tekniker för att kunna ta till vara på redan befintliga resurser för att återskapa dessa till nya produkter eller t.ex. utvinna energi. Även om mycket textilier återvinns är det dock inte säkert att kvaliteten på den återvunna filamentet är likvärdig som på originalet. (Personne & Sundin 2013)

Materialåtervinning delas in i mekanisk och kemisk återvinning, beroende på hur återvinningsprocessen går till. Textila material kan bestå av många olika fibrer och beroende av fiberns ursprung och sammansättning varierar det om mekanisk eller kemisk återvinning passar bäst. (Personne & Sundin 2013)

Mekanisk återvinning och kemisk återvinning kan delas in i fyra olika grupper vilka innefattar primär, sekundär, tertiär respektive kvartära metoder (Albertsson, Edlund & Odelius 2009).

Mekanisk bearbetning – primär bearbetning

Mekanisk bearbetning för natur- eller syntetmaterial innebär att bindningar i textilen och fibrerna hackas, rivs, strimlas och kardas till en jämn fibermassa. Upprivningsprocessen sker i en maskin bestående av cylindrar med vassa blad där materialet rivs upp och slits sönder och kommer ut som en blandning av fibrer, garntrådar och mindre tygbitar. De lösa fibrerna samlas sedan ihop med hjälp av luftdrivna system. Processen kan upprepas ett flertal gånger för att erhålla mycket fina fibrer. (Wang 2006) Denna metod kan användas på alla textila fibrer men vid rivning av syntetmaterial krävs kraftfullare hantering på grund av att dessa filament är starkare än naturfibrer. (Mowbray 2009)

Resultatet med mekaniskt bearbetade fibrer blir ofta en kortare fiberlängd, på grund av att materialet hackas upp, vilket ger fibern en försämrade kvalitet och styrka. Ofta måste de bearbetade filamenten blandas upp med jungfruliga fibrer för att kunna öka kvaliteten och framställa nya garner av kvalitet som passar textilier till t.ex. klädtillverkning. Kvalitet på det återvunna materialet bestäms utifrån längd på fibrerna och graden av sönderrivet material. (Bureau of international recycling u.å; Wang 2006)

På grund av dess försämrade kvalitet (down-cycling) används ofta mekanisk bearbetning till ändamål där kvaliteten inte behöver vara av högre grad, t.ex. fyllningsmaterial till isolation, nonwoven och madrasser. En nackdel med denna metod är att användningsområdet för slutfibern är begränsat. En möjlig nackdel med mekanisk bearbetning är försämrade arbetsmiljö på grund av dammbildning. (Andrady 2003)

Mekanisk återvinning – sekundär återvinning

Mekanisk återvinning innebär att vissa typer av syntetmaterial smälts ned för att återskapas till nya filament. Metoden kräver mindre energi än vid kemisk återvinning, dock blir resultatet en svagare filament med en sämre kvalitet i jämförelse med

kemiska återvinningsprocesser. (Sundin 2011) Eftersom materialet får en försämrad kvalitet vid varje återvinning är metoden inte hållbar på lång sikt. (Shen, Li. Worrel, Ernst. Patel & Mikael K. 2010) Använt material innehåller ofta föroreningar som kan leda till segregering och en nedbrytning under mekanisk återvinning. Därför kan återvunna material med hjälp av mekaniska tekniker ibland få begränsade tillämpningar på grund av dess förlorade egenskaper. (Cho & Kim 2015) För att minska föroreningsproblematiken är det viktigt att inneha en god sortering av det materialet som ska återvinnas (Shen, Li. Worrel, Ernst. Patel & Mikael K. 2010).

PET-flaskor kan idag återvinnas med hjälp av olika typer av återvinningsprocesser, däribland mekanisk återvinning. (Cho & Kim 2015) Återvinningen av PET kan ske genom en sortering och sönderdelning av använda PET-flaskor för att erhålla flingor från flaskans väggar. Dessa tvättas och rengörs sedan för att avlägsna yttre föroreningar. Efter rengöringen torkas de och slutligen kan en önskad produkt framställas genom smältextrudering. (Cho & Kim 2015; Upsani et al. 2012)

För textilier används oftast en inre viskositet $[\eta]$ på cirka 0,6 dL/g för polyetentereftalat och omkring 0,82 dL/g för PET-flaskor och förpackningar. Vid återvinning av polymeren bör termiska aspekter och miljöfaktorer reduceras för att inte förändra materialets egenskaper. Enligt Upsani et.al. (2012) kan en mekanisk återvinning minska inre viskositet $[\eta]$ från 0,82 dL/g till mindre än 0,76 dL/g. Därtill kan diffusion (spontana spridningsprocesser) av tidigare materielinnehåll i en PET-flaska orsaka föroreningar och leda till komplikationer vid nedbrytning av polymeren. I en mekanisk återvinning med alla dess processteg kan polymeren få en förlust av molekylärvikt från 0,82 dL/g till inre viskositet $[\eta]$ 0,6 dL/g. (Upsani et al. 2012) Berglin⁶ säger att det därför är lättare att använda PET-flaskor vid återvinning till nya textilfibrer än att återvinna textilfibrer till nya textilfibrer, då det vanligen blir en minskning av inre viskositet vid återvinning. Tostar⁷ menar på att återvinning är en degraderingsfråga och jämför med pappersåtervinnig där det går att återvinna ca sju gånger sen är fibrerna för korta för att återvinnas. Hon menar på att det är detsamma för återvinning av filament, tillslut kommer de att bli för korta för att återvinna.

För att lösa problemen med en försämrad kvalitet som följer med den mekaniska återvinningen har många forskare undersökt effekten av spinnprocessen och blandmöjligheter utefter de fysikaliska egenskaperna hos återvunna PET-material. (Cho & Kim 2015) Enligt Upsani et al. (2012) finns det möjlighet att minska negativ inverkan av kvalitén på slutprodukten genom att eventuellt blanda jungfrupolyester med brukad polyester innan smälttexturering. I deras undersökning studerades tilllägg av återvunna flingor under en PET polymerisation till antingen ett slam av tereftalsyra och monoetylenglykol eller direkt till smälta oligomerer. Det kunde noteras att faktorer såsom systemets viskositet påverkade blandningen. Därtill bedömdes det att det bör eftersträvas att minska föroreningar i sorteringsstadiet innan påbörjad polymerisation eller innan strängsprutning till filament. Om inte detta gjordes uppkom

⁶ Lena Berglin Universitetslektor Institutionen Textilhögskolan, muntlig intervju den 4 april 2015

⁷ Sandra Tostar Kemi och kemiteknik, Industri Materialåtervinning Chalmers Tekniska Högskola AB, muntlig intervju den 18 maj 2015

föroreningarna som svarta fläckar i polymeren efter återvinningen. (Upsani et al. 2012)

Kemisk återvinning – Teritär återvinning

Kemisk återvinning, även kallad teritär återvinning, är återvinning på molekylär nivå av polymerer eller andra kemiska föreningar (Albertsson, Edlund & Odellius 2009). Genom kemisk återvinning kan materialet förnyas helt genom att filamenten bryts ned med hjälp av kemikalier till dess kemiska minsta beståndsdel, för att sedan återanvändas till nya material. Detta kan ske genom hel eller delvis depolymerisation. Depolymerisation går ut på att bryta ner komplicerade kolföreningar till kolväten under högt tryck och temperatur. T.ex. kan polyamid 6 brytas ned till monomererna caprolactam som är dess ursprungsmaterial. (Scheirs 1998)

Denna process ger hög renhet och kräver ingen destillering, som t.ex. behövs vid en hydrolys vars process beskrivs mer nedan. Ett annat exempel är att använt PET-material som innehåller föroreningar bland annat i form av polyvinylklorid (PVC), natriumhydroxid (NaOH) och alkaliska rengöringsmedel kan avlägsnas vid depolymerisationen. De depolymeriserade materialen filtreras och repolymeriseras sedan efter detta för att kunna skapa önskad produkt. (Cho & Kim 2015)

Kemisk återvinning ger möjlighet att framställa nya råvaror med likvärdig kvalitet som en jungfruliga vara. Därför finns inte behovet av att blanda upp det återvunna materialet med jungfruligt material för att kunna användas på samma sätt som ursprungsfilamentet. (Albertsson, Edlund & Odellius 2009) Genom kemisk återvinning finns det även möjlighet att skapa textilfilament utav återvunna polyesterflaskor på en kommersiell basis (Wang, 2006).

För att kemiska återvinningsmetoder ska vara ekonomiskt försvarbart krävs dock stora mängder material som ska återvinnas eftersom kostnaderna för återvinning blir lägre ju högre kvantitet på material som återvinns. (Albertsson, Edlund & Odellius 2009)

Det finns två huvudgrupper att dela in kemisk återvinning i vilka beskrivs mer nedan. Beroende på vilken teknik som används och hur avancerad tekniken är så kan kemikalier, färger och andra restprodukter rensas ut. (Albertsson, Edlund & Odellius 2009)

Huvudgrupp ett

I huvudgrupp ett sker en kemisk nedbrytning där polymerer bryts ned till monomerer (ensam molekyl) eller andra kemiska föreningar som sedan kan ompolymeras till obegränsat antal molekyler. I denna typ av process används t.ex. hydrolys, acidolys och aminolys som metoder som beskrivs mer ingående nedan. Metoderna i sig är vanliga metoder som används för att bryta ned polyamid 6 respektive polyester. (Scheirs 1998) Ofta kräver dessa processer ett rent material som har samma fysikaliska egenskaper, s.k. ett homogent material (Albertsson, Edlund & Odellius 2009).

Hydrolys

Hydrolys är en kemisk process där en molekyl delas i två delar efter att en vattenmolekyl har adderats. Genom hydrolys kan polymeren depolymeriseras i ett vatten-

lösligt slutet system under tryck. Polymererna separeras och ger t.ex. vid depolymerisering av polyamid 6 en stor mängd utfall av caprolactam. Genom en högre temperatur och ett högre tryck kan större kvantitet caprolactam erhållas, detta kräver dock bättre och dyrare utrustning. Hydrolysen är en billig process eftersom ingen kostsam katalysator behöver tillsättas utan polymeren blandas bara med vatten under tryck. Däremot att sedan destillera vattnet från det utgångsmaterial som fås, som beror på vilken polymer som återvinns, är dyrt. T.ex. kan tvättade PET-flingorna helt depolymeriseras till monomerer genom hydrolys. (Scheirs 1998)

Acidolys

Denna process är relativt lik en hydrolys där en molekyl delas efter att en vattenmolekyl har tillsatts men istället sker sönderdelning av en molekyl, under inverkan av en syra. Vid en acidolys tillsätts en katalysator i form av syra som smälter polymeren. Det sker en kemisk reaktion där molekyler sönderdelas genom att molekylerna i textilen reagerar med syran och materialet smälter. Processen sker i en kontinuerlig reaktor, d.v.s. reaktionen sker under en begränsad tid när reaktanter uppehåller sig i denna. Nya reaktanter tillförs kontinuerligt samtidigt som produkten behandlas med ånga och separeras. (Scheirs 1998)

Aminolys

Aminolys sker på liknande sätt som hydrolys men istället för vatten så används t.ex. ammoniak för att reagera med polymeren. Därtill används en fosfatkatalysator. (Scheirs 1998)

Huvudgrupp 2

I huvudgrupp två sker en så kallad pyrolys som är ett annat sätt att återvinna kemiskt. Här sker en kemisk och fysisk nedbrytning av organiska material i en syrefri miljö där materialet hettas upp. Vid reaktionerna som sker bildas ett lågmolekylärt material genom depolymerisering och kedjefragmentering. Denna metod lämpar sig bäst för additionspolymerer. (Albertsson, Edlund & Odelius 2009). Textilierna bryts ned till gas som sedan kyls och bildar en olja som kan återvinnas. Här kan, till skillnad från i huvudgrupp ett, förorenade och heterogena blandningar pyroliseras utan problem. Pyrolys är en dyr process i förhållande till förbränning. Idag finns det inga kommersiella pyrolysanläggningar för textilier, det är dock teoretiskt sett en bra metod men det är svårt att hitta ekonomi i metoden. (Orring 2013)

Termisk återvinning och energiutnyttjande– kvartär återvinning

Vid kvartär återvinning, bränns textilierna och fiberavfallet och dess fossila energiinnehåll tas till vara på. Olja, kol, biogas, etanol och industrigas kan utvinnas vid kvartär återvinning för att användas till t.ex. bränsle. Även värmeenergi som skapas vid förbränning kan tas vara på eller alternativt skapas kraftvärme som kan skapa elenergi. (Wang 2006)

Detta är idag den vanligaste återvinningstekniken i Sverige som sker för att minska den mängd avfall som deponeras och på så sätt hushålla med resurser. (Albertsson, Edlund & Odelius 2009)

Återvinning av blandmaterial

Kompositmaterial kan påträffas i en rad olika tillämpningar. Enligt Yongxiang Yang et.al (2012) återvinns dock inte dessa korrekt på grund av materialet inte är homogent. Det är känt att det finns olika metoder för återvinning, men återvinning- eller separationsmetoder för kompositmaterial behöver fortfarande utvecklas. Yongxiang Yang et.al (2012) menar att genom att skapa gemensamma ansträngningar för att skapa utveckling inom produkters design, tillverkning och sluthantering kan återvinnings- och separationsmetoder bli enklare och utvecklade i framtiden. (Yongxiang Yang et.al. 2012)

Enligt Wang, Wang och Liu (2015) är plastblandningar svåra att återvinna på grund av dess inre egenskaper (Wang, Wang och Liu 2015). Carvalho, Ferreira, Santos och Paiva (2012) menar att i allmänhet återvinns inte olika polymerer tillsammans på grund av deras oförenlighet under smältprocessen (Carvalho, Ferreira, Santos och Paiva 2012). Dess kemiska inkompatibilitet och skillnad i smältpunkt samt värmestabilitet kan begränsa den återvunna produktens kvalitet. (Carvalho et al. 2012; Kangal 2010).

Återvinning av plast är relativt komplext jämfört med andra material såsom glas eller metall. Detta beror enligt Kangal (2010) på polymerernas höga molekylvikt och materialets kedjestruktur. Plastmaterialens kemiska struktur gör därför att vissa typer av plast inte kan blandas tillsammans i en återvinningsprocess. (Kangal 2010)

Torstar⁸ menar att en del av problematiken kring återvinning av blandmaterial ligger i att det finns väldigt många olika varianter av textila blandningar och att det därför är svårt att ha en universal process som passar alla varianter. Vidare går det endast att se på mikrometernivå om det rör sig om blandmaterial eller ej, eftersom det inte går att se med blotta ögat. Därför behöver materialet noggrant analyseras innan det kan återvinnas. Det är fortfarande en dyr process och det är inte självklart att det tjänar energi i jämförelse med nyproduktion.

Jämförelser återvunnet - icke återvunnet - blandmaterial – enhetligt material

Eftersom det kan vara kostsamt att återvinna polyetentereftalat då det måste gå igenom ett flertal processer är det väsentligt att dess slutliga produkt används till något med högt värde, exempelvis för sportkläder och ytterplagg. Därför är det viktigt att studera olika karakteristiska drag för återvunnen PET-trikå jämfört med jungfrulig PET-material. (Cho & Kim 2015)

I Choi och Kim (2015) studie undersökte de olika karakteristiska drag hos trikåvaror bestående av återvunnet polyetentereftalat (kemiskt och mekaniskt), en blandning av återvunnet PET och nylon 6, respektive jungfrulig PET. Detta i syfte att bredda tillämpningen av återvunna polyetentereftalat-material och på så sett gynna miljön. I dess granskning fann de att töjningen var som bäst när trikåvaran bestod av en blandning av återvunnen PET och nylon 6. När det handlade om noppring hade både jungfrulig och återvunnen polyetentereftalat utmärkta motståndskrafter. Flexibilitet för

⁸ Sandra Tostar Kemi och kemiteknik, Industri Materialåtervinning Chalmers Tekniska Högskola AB, muntlig intervju den 18 maj 2015

de stickade tygerna visade sig vara som bäst när varan bestod av blandningen återvunnen PET och nylon 6. (Cho & Kim 2015)

Utefter utvärderingssystemet Kawabata kunde kompressions- och ytegenskaper mätas för att kunna bedöma om materialet hade en varm respektive kall känsla. Resultatet visade att mekanisk återvunnen PET hade liknande egenskaper som ny PET. Blandmaterialet som trikå hade den svalaste känslan av de fyra proverna och var även det tyg som hade bäst fuktabsorption och fuktpermabilitet. Detta tack vare nylonets hydrofila egenskaper. När de olika återvunna PET-varorna jämfördes kunde det noteras att mekaniskt återvunnen PET hade bättre absorptionsförmåga än kemiskt återvunnen PET-trikå. (Cho & Kim 2015)

Studien påvisade också att draghållfastheten hos det blandade materialet var sämre än hos materialen av 100 % polyester. Enligt Choi och Kim (2015) så beror detta på att blandningen av polyetentereftalat (PET) och polyamid inte är förenliga med varandra, det vill säga att inhomogeniteten påverkar hållfastheten vid detta dragtest. (Choi & Kim 2015)

Eftersom återvinning av blandande plastmaterial är en komplex process, som är under utveckling, går det istället att fokusera på separeringsmetoder som kan skapa homogena material för att sedan kunna återvinna materialen var för sig. (Carvalho et al. 2012; Wang, Wang och Liu 2015) Detta har bland annat gjorts genom att separera kompositmaterial till individuella plaster så att materialen kan användas till mer värdefulla återvunna produkter (Carvalho et al. 2012).

Det finns ett flertal utvecklade tekniker för att separera plastmaterial med avseende på plasters olika egenskaper så som laddning (elektrostatisk separation), densitet och polaritet. (Wang, Wang & Liu 2015; Dodbiba & Fuljita 2004). I följande underrubriker presenteras olika typer av separationsprocesser som anses kunna tillämpas till syntetiska material.

Friktionselektrifiering

Friktionselektrifiering är en typ av elektrostatisk separation som fungerar genom att skapa partiklar med olika laddningsmekanismer och separera dessa i skilda elektriska fält. (Parks, Parks & Jeons 2007) Friktionselektrifiering, till skillnad från vissa andra elektrobaserade separeringsmetoder, användas för att ladda material med liten skillnad i ledningsförmåga. (Asano & Higashiyama 1998) Enligt Parks, Parks och Jeon (2007) kunde PET bli separerat från PVC i ett blandmaterial bestående av dessa två komponenter genom en friktionselektrifieringsteknik. Polyetentereftalaten och polyvinylkloriden laddades positivt respektive negativt och kunde på så sätt separeras i denna process genom motsatta elektriska fält. Laddningseffekten av PET och PVC i Parks, Parks och Jeons (2007) studie var starkt beroende av friktionsladdaren, relativ luftfuktighet, blandningsförhållandet och lufthastigheten. I detta fall var förhållanden optimala när friktionsladdaren bestod av polypropen, fuktigheten låg på under 30 %, blandförhållandet var 1:1, lufthastighet låg på över 10 m/s med en elektropotential på 20 kV och så kallad splitterställning av -2 cm. Detta gav en separering 99,6 % ren PVC och 98,1 % ren PET. Med vidareutvecklad splitterposition kunde senare en 99,99 % renhet av PET fås. (Parks, Parks & Jeons 2007)

Gravitationsseparation

Vid en gravitationsseparation utnyttjas materialens olika densitet och vikt. För gravitationsseparationer är det svårt att separera blandmaterial med samma specifika tyngd, som exempelvis PVC och PET (Parks, Parks & Jeons 2007). Men enligt Hori, Ueda, Hiroyoshi, Ito och Okada (2009) kan plastartiklar med likartade vikter separeras genom en hybridjiggmetod som är en utveckling av en jigg- och flotationsteknik. Processen testades på blandmaterial av PVC, PE och PET. Materialpartiklarna var cylindriska med en längd och diameter på 2-3 mm med en densitet mellan 1,05–1,55 g/cm³. Vid ett jiggförlopp utan luftbubblor var plastartiklar med liknande egenskaper svåra att separera. Däremot kunde en hybridjiggsprocess med luftbubblor separera plastprodukter med liknande specifika vikt och det utvanns högkvalitativa produkter med 99,9 % utvinning. (Hori, Ueda, Hiroyoshi, Ito & Okada 2009)

Skumflotation

En separationsteknik som fått uppmärksamhet är så kallad skumflotation (Dodbiba & Fuljita 2004; Wang, Wang & Liu 2015). Flotation är en fysikalisk och kemisk process som traditionellt används för att separera olika fasta material baserat på en

skillnad i polaritet. (Nagy, Skvarla & Sisol 2011). Enligt Ásbjörnsson⁹ fungerar skumflotation genom att blandmaterial samlas i en vattenbaserad vätska där en lufttillförsel som skapar bubblor drar åt sig hydrofoba material och separerar dessa från vätskan upp till ytan där de kan avskiljas. Tekniken är effektivitet för att åtskilja plast med liknande egenskaper såsom densitet och hydrofobitet. Därtill är metoden en kostnadseffektiv teknik (Wang, Wang, Fu & Gu 2014; 2013). Dock finns en del problematik med skumflotationsprocessen. Bland annat kan det vara svårt att hantera avfallet av de vattenbaserade ämnena. (Parks, Parks & Jeons 2007)

På grund av att de flesta plaster har låg ytenergi och hydrofoba egenskaper krävs en selektiv vätning för en eller flera komponenter i en flotationsprocess. Detta kan ske genom adsorption av ytaktiva ämnen eller via en modifiering av materialets yta, exempelvis med hjälp av garvsyra, lignosulfonater och metylcellulosa. (Wang, Wang & Liu 2015) Utöver vätmedel kan fysikaliska behandlingar också skapa förändrade egenskaper med hjälp av värme- eller plasmabehandling (Nagy, Skvarla & Sisol 2011).

Det finns flera studier som påvisar att PET kan separeras från andra typer av material genom skumflotation (Carvalho et al. 2012). Enligt Nagy, Skvarla och Sisol (2011) kan en alkalisk hydrolys förbättra vätbarheten hos PET och användas genom en flotationsprocess för att separera PET från PVC. Under ett tidsintervall på två minuter kunde en natriumhydroxidlösning upp till 6 % koncentrat vid en temperatur under 60°C skapa en tillräckligt stor skillnad mellan materialen för att vidare kunna separera produkterna. (Nagy, Skvarla & Sisol 2011) I Kangals (2010) studie visades att polyetentereftalat kunde separeras från högdensitets-polyeten (HDPE) genom NaOH och DIB-mjukgörare i en skumflotation. Materialen behöll sin renhet med 99,6 %. (Kangal 2010) Wang, Wang och Liu (2015) menar att skumflotation gör det möjligt att separera polyetentereftalat från resterande avfall vid plaståtervinning (Wang, Wang & Liu 2015). I ett experiment kunde en alkalisk förbehandling av PET med 10 % NaOH under 20 minuter vid 70°C skapa en separation från PS, PVC eller PC vid flotationsteknik. Renheten hos polyetentereftalaten var då upp till 98,46 %. (Wang, Wang & Liu 2015)

Extrahering

Extrahering är en vanlig separeringsmetod som baseras på att de ämnen som ska separeras har olika löslighet. Det finns olika tillämpningar av extrahering, till exempel bygger en metod på att separera de olika föreningarna i materialet genom extrahering av lösliga föreningar från ett fast ämne med en vätska. Det ämne som ska separeras (det extraherade ämnet) reagerar med extraktionslösningen (den lösning som ska få ämnena att separera). (Utbildningsstyrelsen 2013)

Den lösningen som materialet ska lösas upp i, så kallad extraktionslösning, väljs beroende på de föreningar som ska separeras. Vanligen för att separera opolära föreningar, t.ex. olja, används lösningsmedel av kolväten, blandningar av kolväten eller klorerade kolväten. För att extrahera polära föreningar är ett lämpligt lösningsmedel vatten eller olika alkoholer. (Utbildningsstyrelsen 2013)

⁹ Gauti Ásbjörnsson Doktorand Produktutveckling Chalmers Tekniska Högskola AB, muntlig intervju den 5 maj 2015

Vanligen brukar komponenter i den blandning av ämnen som ska separeras inte kunna separeras vid ett enda separeringsförsök. Processen behöver därför upprepas med ett rent lösningsmedel så många gånger att samtliga föreningar som ska separeras fås bort från det ämne som hjälpt till att separera blandningskomponenterna. (Utbildningsstyrelsen 2013)

4. PRAKTISKT ARBETE

Utefter informationsinsamlingen och intervjuer presenteras olika förslag som anses lämpliga för att kunna separera polyamid och polyester på en laborationsmässig skala. Därtill demonstreras resultat för genomfört experiment, vilken är baserad på en av separeringsidéerna.

4.1. FÖRSLAG TILL PRAKTISKA EXPERIMENT

Nedan beskrivs tre metoder som enligt Holm¹⁰ kan vara förslag på experiment att utföra för att undersöka möjligheter att separera polyamid och polyester.

De två första beskrivande experimenten är uppbyggda utefter att textilen bestående av blandmaterialet har bearbetas mekaniskt till ett finkornt ”sandlikande” material. Hur detta ska göras beskrivs inte i dessa experiment.

För att sedan analysera om polyamid och polyester har separerats ifrån varandra kan olika analyser tillämpas. Olika typer av analystekniker kan vara:

* Färgning med färgklass som inte binder på polyester- respektive polyamidfilamentet. T.ex. kan syrafärg användas för att färga polyamid men inte för att färga polyester (Gohl & Vilensky 1991).

* Ett annat alternativ kan vara att göra en spektrofotometrisk bestämning av mängden produkt i en lösning. Vi denna typ av metod måste dock fibrernas olika förmåga att absorbera ljus vid olika våglängder vara känd.

* Gaskromatografi.

4.1.1. SEPARERTRATT

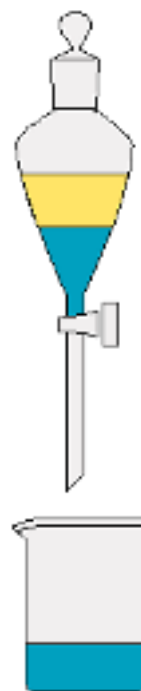
Att använda sig av en separertratt (se figur 2) för att separera blandmaterialet är en form av extraheringsmetod. Separation sker av det blandade materialet med avseende på materialens polaritet. Tanken är att blandmaterialet av polyamid och polyester består av ett mer hydrofilt polärt material (polyamid) än det andra vilket är ett hydrofobt opolärt material (polyester).

En lösning blandas av två vätskor som inte är blandbara med varandra, t.ex. vatten och ett organiskt lösningsmedel som olja, bildar två faser. Det bearbetade pulvret av de två materialkomponenterna blandas sedan i lösningen för att se om olika fasnivåer av pulvret kan uppstå i vätskelösningen. Det vill säga att en vattenlöslig fas (polär) och en ej vattenlöslig fas (opolär fas) ska bildas av pulvret tillsammans med vätskelösningen.

För att skapa de olika fasnivåerna fylls separertratten med blandningen och skakas om. Är det här en fungerande separationsmetod är tanken att polyester hamna i oljefasen på ytan och polyamiden i vattenfasen och på så sätt kan de båda materialen skiljas åt.

¹⁰ John Holm Kemilärare Katedralskolan Linköping, muntlig intervju den 9 maj 2015

Separering från de två olika faserna med dess respektive lösningsmedel måste ske på olika sätt. Genom indunstning av den vattenlösliga fasen där det förmodas att polyamiden har hamnat kan polyamiden skiljas från vattnet. Vid den opolära fasen, oljan, där det förmodas att polyestern har hamnat blir det mer problematiskt att separera bort oljan. En metod för att kunna skiljas dessa åt kan eventuellt vara en typ av kromatografi som extraktion för att skilja olika molekyler i en blandning ifrån varandra. Det finns olika typer av kromatografiska metoder men gemensamt för alla är att de har en rörlig fas och en stationär fas. I den rörliga fasen löses blandningen som ska extraheras, denna lösning går sedan genom den stationära fasen. Genom att interaktioner med den stationära fasen kommer separering av blandningen ske. Vilken typ av kromatografi som skulle passa i detta fall måste studeras vidare.



Ytterligare en problematik med detta experiment är att bestämma vilken typ av organiskt lösningsmedel som ska användas för att kunna få polyestern att hamna i dess förväntade fas samt att sedan kunna skilja dessa åt.

FIGUR 2 SEPARERTRATT DÄR DEN BLÅ OCH GULA FÄRGEN INDIKERAR DE TVÅ FASNIVÅERNA. (NATURVETENSKAP SVERIGE 2015)

4.1.2. ELEKTROFORES

För att göra en analys på en småskalig nivå kan en elektrofores utföras som baseras på att försöka separera de två olika filamenten i textilen med en strömkälla, t.ex. en likströmskälla. Mest troligt har de båda materialen inte olika elektrostatiska laddningar innan elektroforesen genomförs och därför ges de olika laddningar med hjälp av t.ex. en sur lösning. Tanken är att ge amidgrupperna i polyamiden en positiv laddning med hjälp av en syra. Här utnyttjas att amidgrupperna är en starkare bas än estergrupperna och tanken är därför att amidgrupperna tidigare kommer bli positivt laddade än polyestern i en sur lösning. De laddade filamenten ska sedan blandas med en gel av t.ex. potatismjöl och vatten för att sedan leda elektrisk ström genom den. Om filamenten som ingår i blandmaterialet har fått olika laddning i den sura lösningen kommer de att uppträda olika i det elektriska fält som uppstår.

Gelen tillsammans med filamenten läggs på ett objektglas där det fästes krokodilklämmor med strömkablar på varsin sida av objektglaset. Då det kan bli väldigt varmt i elektroforesen kan objektglaset läggas på ett urglas fyllt med is. Sedan ansluts kablar till strömkällan. Elektroforesen ska ske under en viss tid bl.a. beroende på vilken spänning som används. Vid en elektrofores av karamellfärg sker detta under 15 minuter då en spänning på 20V används.

Efter att elektroforesen har vart på bestämd tid så stängs spänningsaggregatet av och kablarna tas bort. Tanken är sedan att analyseras om filamenten med olika laddning

har vandrat åt varsin pol. Detta kan t.ex. analyseras genom att skrapa av gel vid pluspolen eller minuspolen och sedan studera med hjälp av analys om endast en av filamenten ha vandrat till den polen. Tanken är då att polyamiden som är plusladdad ska ha vandrat till minuspolens sida av objektglaset.

Vid utförande av detta experiment krävs en försiktighet vid elektroforesen då den blir varm och strömförande. Vid användning av en likströmskälla kan även spänningen bli hög. Det behöver även, innan elektroforesen utförs, bestämmas hur mycket syra som ska användas för att inte påverka estergrupperna i polyestern så att deras bindningar inte knäcks upp. (Celandier 1998)

Fås ett lyckat resultat ut av elektroforesen kan experimentet graderas upp till en elektrolys. En elektrolys bygger på samma princip som en elektrofores men testet utförs i en större skala, t.ex. badkarsstorlek, och med ett mer vätskeliknande lösningsmedel som gör det lättare för polymererna att vandra.

4.1.3. ACIDOLYS

Det tredje experimentet bygger på en typ av acidolys där det utnyttjas att polyamid och polyester har olika löslighet i koncentrationer av syror. Detta kan utnyttjas genom att doppa blandmaterialet i en lösning av en syra som löser upp det ena materialet men bibehåller det andra. I en lösnings och kemikalieguide går det att utläsa att polyamid går att lösa upp med myrsyra men inte polyester. Det står även att ättiksyra och svavelsyra löser upp polyamid och polyester vid olika koncentrationer då polyamiden bryts ned vid lägre koncentrationer än polyestern vid påverkan av syran. (Carlisle u.å.)

4.2. NEDBRYTNING AV POLYAMID MED SYRA

Ett test som baseras på acidolysmetoden görs vid en laboration på Textilhögskolan i Borås. Laborationen härleds av Lena Berglin och de kemikalier som brukas är begränsade till de som finns tillgängliga på högskolan. Laborationen sker i syfte att se om det går att erhålla ett rent polyestermaterial och få bort en polyamidtråd ur en blandning av de båda polymererna.

I tabell 2 demonstreras resultatet för laborationen med lösningar med syra. I denna kan det noteras om polyamiden synligt löses upp samt vad provet väger efter att det varit i lösningen, torkats och vägts. Anmärkningar som noteras under testet skrivs även in i tabellen.

Pr ov	Syra	Löses polyamiden?	Tid (min)	Vikt PET (g)	Vikt PA (g)	Vikt Efter labb (g)	Anmärkningar
1	Myrsyra 85 %	Ja	1:34	0,0038	0,0038	0,0034	Svårare att få bort där det är tigare tvinnat
2	Svavelsyra 95 %	Ja	1:58	0,0037	0,0038	0,0035	Svårare att få bort där det är tigare tvinnat
3	Ättiksyra 24 %	Nej	1:00	0,0037	0,0039	0,0067	För blotta ögat har inget försvunnit

TABELL 2 RESULTAT AV LABORATION MED SYRA. VILKEN SYRA SOM ANVÄNTS, OM POLYAMIDEN SYNLIKT LÖSES UPP, PROVETS VIKT FÖRE OCH EFTER TEST SAMT ANMÄRKNINGAR.

Det kan noteras att det har skett en större viktninskning av prov 1 och 2, samt att båda dessa har erhållit en viktninskning som motsvarat polyamidens vikt plus lite till. Frågan här är om det finns felmarginaler för viktmätningen eller om syran även påverkat polyestern. För lösningen i ättiksyra går det att se att det inte hänt lika mycket jämfört med de andra två syrorna. Här kan det snarare handla om att koncentrationen på lösningen inte är tillräckligt hög eller att polyamiden inte vill reagera med denna typ av syra. Dessa parametrar justeras inte under detta projekt på grund av brist på tid och resurser utan hänvisas till vidare forskning.

Test av tyg från Houdini Sportswear

Nedan redovisas tygets procentuella viktskillnad innan och efter laboration:

- Vikt före: 0,3290 g
- Vikt efter: 0,2860 g
- Procentuell viktninskning: 13 %

Tyget består utav 50 % polyester, 40 % polyamid och 10 % elasthan. Vid denna laboration skulle provbitens vikt ha minskat med 40 % om hela mängden av polyamiden lösts upp. Därför kan det noteras att så inte är fallet när tyget endast fått en viktninskning med 13 %. Eftersom det inte finns en grundlig kravspecifikation för tyget kan det vara svårt att räkna in felfaktorer som filamentutformning, behandlingar och elasthanets påverkan.

5. DISKUSSION/SLUTSATS

I denna del av rapporten presenteras slutsatser till de forskningsfrågor som stått till grund för arbetet samt diskussioner som skapats genom inhämtad information under projektet eller genom egna tankar kring ämnet. Dessa handlar om ämnen som berör textiliers råvara, material, miljömedvetenhet, ekonomi, avfallsdirektiv, återvinning, separation och det praktiska arbetet som genomfört i detta arbete.

5.1. ÅTERVINNING AV POLYESTER RESPEKTIVE POLYAMID

Polyamid respektive polyester kan återvinnas på liknande vis och det finns redan befintliga metoder för att återvinna polymererna separat. Oftast är dock dessa metoder avsedda för att återvinna ett homogent material. När det gäller att återvinna textila fibrer passar återvinningsmetoderna bäst till ett material som inte blivit brukat och processen är mer tillämplig för t.ex. spillmaterial från produktion eller annat typ av material som är oanvänt. Detta för att kunna veta vad textilen har utsatts för eventuella behandlingar m.m.

Det finns idag generellt två huvudkategorier som används när det gäller att återvinna textilier till nya fibrer. Den ena är mekanisk återvinning vilket oftast leder till en sämre kvalitet hos det återvunna materialet i förhållande till ett jungfruligt material. Den andra är kemisk återvinning vilken i sin tur innefattar en rad olika metoder där de flesta bygger på att tillsätta en typ av katalysator. Exempelvis är det vanligt att vid en hydrolys tillsätta vatten och vid acidolys blanda i en syra som katalysator. Polyamid 6 kan bland annat brytas ned med myrsyra, svavelsyra och ättiksyra.

Teijin är ett företag som är stora på att återvinna polyester av bl.a. gamla PET-flaskor. De har skapat ett slutet system som de kalla Eco Circle som gör det möjligt att återvinna polyester flera gånger om.

5.2. POLYESTER OCH POLYAMID SOM BLANDMATERIAL

Som det ser ut idag kan inte polyester och polyamid återvinnas som blandmaterial och uppnå likvärdig kvalitet som det ursprungliga materialet. I alla fall har det inte i detta arbete lyckats hitta litterär grund eller information från intervjuer kring detta. Ordet "kan" är dock en definitionsfråga enligt kemister vi intervjuat. De menar att det går att återvinna men frågan är till vilken kvalitet som resultat. Mer specifikt kan svaret vara att det går att återvinna men inte till likvärdig kvalitet som ursprungsmaterialet om fibrerna återvinns som ett blandmaterial. Det går idag att återvinna olika komponenter av blandmaterial genom att tillsätta kompilerer för att stärka kvalitén, dock är det svårt att avgöra till vilken gräns ett material kan anses vara återvunnen då nya komponenter tillsätts.

5.3. SEPARATION AV POLYESTER OCH POLYAMID

Det finns goda förhoppningar om att det ska gå att separera polyamid och polyester som blandmaterial från varandra i de förslag som angivits i rapporten. Enligt flertal intervjuade personer (som finns med i denna rapport) är det möjligt att separera men varför det inte görs idag är troligen en ekonomisk fråga eftersom det krävs många olika processteg för att separera vilket är tidskrävande och kostsamt. Dessutom beror det på att det ofta krävs stora mängder material för att återvinna, Dan Åkesson säger

bl.a. att mycket är möjligt att separera i en liten skala på laborationsnivå men blir svårare när det krävs en större kvantitet.

5.4. RÅVARA

För att förstå varför det är viktigt att återskapa nya syntetiska filament har det i detta arbete vart väsentligt att beröra textiliers råvara. Syntetiska material består som tidigare nämnts vanligtvis av den fossila råvaran petroleum, vilken har en producerings-takt på 100 000 år. En intressant hållbarhetsaspekt kring textila produkter som vi tidigare genom textilingenjörutbildningen haft i åtanke och som skapat diskussioner även i detta arbete är förhållandet till naturfibrer respektive syntetfibrer. Själva upplever vi att många konsumenter tänker på att naturliga fibrer är det bästa eftersom det finns en förnybar resurs. Det är även lätt att tänka att polyesters och polyamids icke förnyelsebar råvara kräver stora mängder energi, men även naturfibrer kräver energitillförsel och dess råvaror kan fördrå stora mängder vatten. Det vore därför intresseväckande att klargöra en omfattande livscykelanalys för olika material samt att undersöka vidare nya och innovativa material som på senare år utvecklats, såsom biologiskt nedbrytbara polyestrar eller biopolymeren sorona. Frågan är bara om problem löses genom att skapa biologiskt nedbrytbara produkter då dessa kommer hamna i deponier istället för att skapa ett slutet cykel.

5.5. MATERIAL

Om man vill tacklas med petroleum genom att återvinna syntetiska textilier finns ändå problematik kvar. Bl.a. syftar vi till att tekniken är komplicerad, energikrävande och att den återvunna produkten inte får likvärdig kvalitet än samma produkt framställd av ny råvara. Denna kvalitetsfråga vore intressant att undersöka vidare och jämföra återvunna textilier med icke återvunna varianter för att ge ytterligare information om detta påstående stämmer eller om det kan främjas en positivare inställning kring återvunna produkters kvalitet.

Eftersom Houdini använder ett blandmaterial som kräver en komplex återvinningsmetod vore det intressant att undersöka vilka andra alternativ material som skulle kunna motsvara denna. Kan det t.ex. finnas textureringar/tvärnsnitt/behandlings av polyamidfilamentet som ger ett plagg en lika god komfort som polyester men ändå behåller sin slitstyrka och är återvinningsbar? Eller finns det en polyester som kan få mer nötbeständiga egenskaper som liknar polyamid? Att få en mer klar bild över varför blandmaterial används vore också intressant för att se över hur dess fördelar jämförs med det faktum att det är svårt att återvinna blandmaterial på grund av dess inkompatibilitet och omfattande processteg. I detta arbete har det bland annat kunnat hittas information om att syntetfibrer kan vara mer hållbara i den meningen att de har längre livslängd än naturfibrer.

5.6. MILJÖMEDVETENHET

För att kunna återskapa nya syntetiska material måste det finnas ett allmänt intresse. Vi tycker att miljömedvetenhet har blivit stor de senaste åren och att det är fler och fler som väljer ekologiskt och/eller fairtrade-märkta varor. Framför allt i matbutiker där företagen gör tydliga skylningar och reklam för att kunder ska se att de kan välja med större miljömässig- och social omsorg i just deras butiker. Är detta på väg att bli intresse när det gäller textilier? Vi anser att det kan märkas att det finns ett större

intresse genom nya innovativa material och genom att textil har blivit väldigt tydlig i media. Flera nya program har börjat visas på TV där det visas arbetsförhållanden i textilindustrin i fattiga länder t.ex. Bangladesh, hur du kan laga dina kläder, tips på hur du tvättar och mycket annat. Det finns även en del fokus på hållbara arbeten i tidningar och hur allt fler företag fokuserar på detta. Undrar om det om några år kommer bli lika vanligt att hitta plagg från återvunna fibrer i en klädbutik som att se ett ekologiskt äpple i mataffären. Eller att en återvunnen T-shirt blir lika reklamförd som en fairtrademärkt banan.

5.7. EKONOMI

För att fler företag ska integrera med återvinning behövs en marknad som gör det gynnsamt att försöka återskapa syntetiska textilier. Vad som framgått under rapporten varför icke återvunnet material väljs framför återvunnet är framför allt kopplat till ekonomiska frågor, kvantitet och efterfrågan. Hur mycket mer i pris en återvunnen polyester- eller polyamidtextil skiljer sig från ny råvara är i många fall så stor att företag väljer att använda sig av icke återvunnet eftersom företaget måste gå med vinst för att kunna vara befintlig.

Verksamheters visioner kan påverka deras val och det skulle troligtvis finnas goda möjligheter för företag att skapa en lika stor vinst även om de samarbetar med återvinningsindustrin genom att exempelvis höja slutproduktens pris. Dock är detta svårt då konkurrenter behöver tas hänsyn till och det faktum att konsumenter oftast väljer det billigare alternativet. Emellertid är det svårt att göra detta uttalande då det inte har erhållits en stor variation fakta på detta eller gjorts någon omfattande marknadsanalys.

Vi tror starkt på att huruvida företag jobbar med hållbar utveckling är beroende av kunders efterfrågan och krav eller genom lagar. När ett klädföretag blir gynnsamt av att sälja ekologiska eller återvunna produkter kommer de troligen börja ställa krav på att erhålla dessa från leverantörer och eventuellt göra en skillnad gällande statliga regler i länder där minimilönen inte är en godtycklig levnadslön. Alltså är det samverkan mellan flera faktorer och driv som behövs för att kunna göra skillnad.

5.8. AVFALLSDIERKTIV

Idén bakom att försöka återvinna textilier är delvis baserade på den mängden avfall som skapas idag och därför har detta varit en viktig del i detta arbete. En del av problematiken kring avfallshantering anser vi relatera till att det är svårt för konsumenter att veta hur ett plagg ska hanteras när man väl tröttnat på det eller plagget inte längre kan användas. Därför slängs stora mängder textilier idag vilket skapar omfattande avfall i deponier. Det vore därför en fördel att göra det lika enkelt för användare att slänga sina plagg i en insamling för återvinning av textilier som det är att slänga återvinning av plastflaskor. Denna idé har redan börjat bli använd av flera klädföretag, däribland Houdini Sportswear. Problemet kan dock kvarstå i att många plagg inte är möjliga att återvinnas på grund av dess fiber- eller filamentinnehåll eller på grund av föroreningar eller behandlingar i textilen. Även om en produkt skulle vara återvinningsbar kan informationen om plagget försvunnit under dess livstid eller inte varit transparent från tillverkningens start. Därför vore det intressant enligt oss att blicka tillbaka till produktens början och integrera ett chip eller QR-kod där innehåll, materieluppbyggnad och behandlingar i textilierna. Dessa skulle

sedan kunna läsas av och registreras i en sorteringsprocess som kan avgöra vilka plagg som är återvinningsbara. Detta är troligtvis dock en kostnads och kvantitetsfråga, men vi anser att det är en intressant tanke som troligtvis har goda utvecklingsmöjligheter. Ett annat alternativ för att generera synligt materielinnehållet vore eventuellt möjligt genom att skapa en lagstiftning som kräver att företag gör samtliga komponenter i textilen synliga precis som för livsmedelsprodukter.

5.9. ÅTERVINNING

Vi har i detta arbete beskrivit att återvinning av homogena material är en befintlig teknik. Bl.a. är det möjligt att på industriell basis återvinna PET-flaskor till nya plastflaskor men även som textilfibrer. Frågan är bara vad som händer när PET-flaskan inte blir till en ny flaska utan till en polyesterjacka. Om vi ska fortsätta använda PET-flaskor till dryck behövs då inte ett råvarumaterial att göra nya PET-flaskor av? Då krävs väl ändå icke förnybara resurser som olja likväl som det behövs för att göra fibrer? Därför tänker vi att det troligtvis på längre sikt vara mer hållbart att samla in och återvinna textil till textil istället för att använda ett material som behöver ersättas med nytt material.

Termen miljövänlig är grundad i syfte att definiera en process som är effektiv utan att skada miljön. Dock är detta ett omöjligt mål eftersom alla processteg är miljökadliga viss mån. Ett förtroende för återvinning eller återanvändning riskerar att vara missledande eftersom båda dessa tillvägagångssätt kräver energi i form av transport eller resurser till att uppnå en ny slutprodukt. Denna slutprodukt kan dessutom ha betydligt sämre egenskaper än utgångsmaterialet och eventuellt innehålla giftiga ämnen som ett resultat från tillsatser som krävs vid övergången från originalmaterial till nytt material. Återvinning kan också ibland anses som en förebyggande strategi, men i en studie kunde vi se att föroreningar genom återvinning inte kommer minska eller kontrolleras utan dolt omvandlas till annan förorening eller bara flyttas från ett område till ett annat. Avfallsminimering kan snarare uppnås genom att uppmärksamma viktiga detaljer i själva produktionen. Såsom kontroll av temperatur, luftfuktighet, utsläpp eller reagenser.

5.10. SEPARATION

I litteratursökningen har det hittats en hel del artiklar angående separationsmetoder inom plaståtervinning av PET. Ofta handlar de om att kunna få bort orenheter, såsom PVC, från plasten och på så sätt skapa en renare produkt. Tyvärr fann vi dock ingen info om dessa separationsmetoder som direkt berörde polyester tillsammans med polyamid. Vi känner ändå att dessa är viktiga att ta upp i detta arbete då några metoder verkar kunna tillämpas på blandmaterial av polyester och polyamid. Exempelvis vid skumflotation där ett hydrofobt material kan separeras från ett hydrofilt. Eftersom polyester endast påvisar hydrofoba egenskaper och polyamid är något hydrofilt finns det hopp om att denna teknik kommer kunna tillämpas. Dock är vi lite skeptiska huruvida blandmaterialet skulle kunna brytas upp i tillräckligt små partiklar som fungerar att separeras i denna process. Därtill är det som många andra gånger en kostnadsfråga när antalet processteg ökar.

5.11. PRAKTISKT ARBETE

I denna rapport utfördes en laboration med syra. Dess utförande var främst baserad från intervjuer och på grund av brist på tid respektive resurser gjordes testet utan en statistisk uträkning eller faktor försök. Vi ville undersöka om det gick att få bort polyamiden från en blandning av polyester och polyamid för att bygga upp detta till vidare forskning. I testet undersöktes separationen av tvinnade trådar samt ett tätt stickat tyg. Det vore intressant att göra flertal test med olika strukturer för att se hur tätheten påverkade resultatet. Dessutom skulle olika lösningskoncentrationer och tidsintervaller vara intressant. I vårt test värderas resultatet utefter om det kan ses med blotta ögat att den gröna (polyamid) tråden försvinner och genom att kontrollera garnets vikt före och efter det provet. För att vara helt säker på att polyamidtråden är helt borta eller inte bör det användas en annan metod eftersom det finns en del osäkerheter angående om polyamiden är helt upplöst eller om syran också påverkat polyester. Det vore även intressant att undersöka om det finns möjligheter att utnyttja den upplösta polyamiden. Skulle denna vara möjlig att depolymerisera till en filament eller annan kvalitativ produkt? I så fall kan denna metod vara användbar för att skapa två nya rena material och inte främja restprodukter eller riskera att skada vattnedrag med eventuella plastrester som kanske inte kan filtreras bort. Det vore även intressant att studera vad det finns för olika nackdelar respektive fördelar med de olika lösningsmedlen som kan användas för att separera polyester från polyamid.

6. FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE

Under detta projekt har det uppstått många intressanta sidospår som anses intressanta att följa upp. Nedan introduceras några förslag som kan undersökas vidare:

- Pröva att återvinna blandmaterial utan separation. Exempelvis testa praktiskt om de går att smälta samman till ett filament?
- Undersöka vilka olika typer av metoder som kan användas för att bearbeta textilier till rätt form och storlek för att möjliggöra separationer av materialet.
- Se om projektets förklarade separationsmetoder fungerar genom att testa dessa praktiskt.
- Om separationsmetoder fungerar, testa praktiskt att återvinna de enskilda materialen.
- Bygga vidare på den laboration som utfördes i detta arbete genom att använda flera typer av syror samt testa dessa i olika koncentrationer och tidsintervall med textilier av olika strukturer.
- Studera möjliga analysmetoder som kan användas för att avgöra hur rent material som erhållits efter separering.
- Se om antalet processteg kan minimeras för återvinnings- eller separations-tekniker.
- Kontrollera direkta och indirekta ekonomiska faktorer kring återvinning.
- Undersöka vilka alternativa material som kan vara ersättare till en blandning av polyester och polyamid. Det vill säga studera innovativa och hållbara material såsom sorona.
- Utföra en gedigen marknadsanalys av material. Vilka material finns på marknaden idag som ska vara slitåliga, komfortabla och miljövänliga? Hur stora kvantiteter av vardera material är vanligt?
- Göra grundliga livscykelanalyser av olika material för att se över deras miljömässiga-, sociala- och ekonomiska hållbarhet.

7. REFERENSER

- Aizenshtein, E. (2009). Polyester fibres continue to dominate on the world textile raw materials balance sheet. *Fibre Chemistry*, Vol. 41(1), ss.1-8.
- Albertsson, A., Edlund, U. & Odelius, K. (2009). *Polymerteknologi: makromolekylär design*. Stockholm: KTH.
- Andrady, L. A. (2003), *Plastics and the environment*. New Jersey; John Wiley & Sons
- Asano, K. & Higashiyama, Y. (1998). *RECENT PROGRESS IN ELECTROSTATIC SEPARATION TECHNOLOGY*. *Particulate Science and Technology*, 16(1), ss. 77-90.
- Bergner, A. (2013). *Swerea Lättvikt Tekniska textilier*. (Swerea IVF rapport 13004). Mölndal: Swerea IVF AB.
- Bureau of international recycling. (u.å.). *Textiles*. <http://www.bir.org/industry/textiles/> [2015-05-14]
- Bäckström (u.å.). *Materiallära*. <http://www.helenabackstrom.net/materi-allaumlra.html> [2015-04-27]
- Carlisle (u.å.). *Solvent & chemical resistance information*. <http://rfel-ektronik.se/manuals/Datasheets/solventguide.pdf> [2015-05-18]
- Carvalho, M.T., Ferreira, C., Santos, L.R. & Paiva, M.C. (2012). Optimization of froth flotation procedure for poly(ethylene terephthalate) recycling industry. *Polymer Engineering & Science*, 52(1), ss. 157-164.
- Celander, G. (1998). *Elektrofores av grön hushållsfärg*. <http://www.edu.fi/laboratorieanalyser/analysmetoder> [2015-05-16]
- Choi, Y.J. & Kim, S.H. (2015) Characterization of recycled polyethylene terephthalates and polyethylene terephthalate–nylon6 blend knitted fabrics. *Textile Research Journal*, 85(4), ss. 337-345.
- Daly, H. (1994). Fossil fuels. *Applied Energy*, 47(2), ss. 101-121.
- Deopura, B. L. (2008) *Polyamide fibers*. Cambridge: Woodhead Publ.
- Dike, E. & Dike, N.I. (2012). Economics and Environmental Resources: Review. *International Business Research*, 5(12), ss. 161.
- Dodbiba, G & Fuljita, T. (2004). Process in separating plastic materials for recycling. *Physical Separation in Science and Engineering*, 13(3–4), ss. 165–182.
- Europaparlamentet och europeiska unionens råd. (2008). *Direktiv; Europaparlamentets och rådets direktiv 2008/98/EG*. <https://www.noti-sum.se/rnp/eu/lag/308L0098.htm> [2015-05-11]

- Fan, Q., Hoskote, S. & Hou, Y. (2004). Reduction of colorants in nylon flock dyeing effluent. *Journal of hazardous materials*, 112(1), ss. 123-131.
- Gohl, E. P. G. & Vilensky, L. D. (1991). *Textile Science*. Second edition. Melbourne: Longman Cheshire.
- Gu, J. (2003). Microbiological deterioration and degradation of synthetic polymeric materials: recent research advances. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 52(2), ss. 69-91.
- Hansen, S. & Atwood, K. B. (2005). *Polyester Fibers*. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. DuPont Company, Inc.
- Hatch, K. (1993). *Textile science*. Minneapolis/Saint Paul: West Publishing Company.
- Hawley, J.M. (2010). Textile recycling: a system perspective. I Wang, I. (red.) *Recycling in Textiles*. Cambridge: Woodhead Publ, Boca Raton, ss. 7-24.
- Hori, K., Tsunekawa, M., Ueda, M., Hiroyoshi, N., Ito, M. and Okada, H. (2009). Development of a New Gravity Separator for Plastics. *The Mining and Materials Processing Institute of Japan, Materials Transactions*, 50(12), ss. 2844-284.
- Houdini Sportswear (u.å.). *Om Houdini*. <http://www.houdinisportswear.com/se/about> [2015-04-27]
- Hu, J. (2008). *Fabric testing*. Woodhead publishing in textiles in association with the Textile Institute, Cambridge, England; Boca Raton.
- Humphries, M. (2009). *Fabric Reference*. 4. uppl., Upper Sadle River N.J: Pearson Prentice Hall.
- Jönsson, K. (u.å.). *Avfallstrappan- en ordning om hur avfall ska hanteras*. <http://www.sopor.nu/Rena-fakta/Miljoemaal/Avfallstrappan> [2015-05-11]
- Kadolph, S. J. (2006) *Textiles*. Prentice Hall.
- Kangal, M. (2010). Selective Flotation Technique for Separation of PET and HDPE Used in Drinking Water Bottles. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 31(4), ss. 214-223.
- Lindqvist, H (2014). *Lagar och regler om avfall*. <http://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Vagledning/Avfall/Lagar-och-regler-om-avfall/> [2015-05-11]
- Magruder, K. (2009). Recovering costs. *Ecotextile news*, (Juli) ss. 16-17.
- McIntyre, J. E. (2005) *Synthetic fibres: nylon, polyetser, acrylic, polyolefin*. Cambridge: Woodhead Publ.
- Meulenbelt, J. (2012). Nitrogen and nitrogen oxides. *Medicine*, 40(3), ss. 139-139.

- Mishra, R., Behera, B. & Militky, J. (2014). Recycling of textile waste into green composites: Performance characterization. *Polymer Composites*, 35(10), ss. 1960-1967.
- Mowbray, J. (2009) Patagonia climbs over recycling problems. *Ecotextile news*, (April), ss 16-18.
- Nagy, M., Skvarla, J. & Sisol, M. (2011). A possibility of using the flotation process to separate plastics. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 9(3), ss. 275
- Naturvetenskap Sverige. (2015). *Separertratt*. <http://www.naturvetenskap.org/kemi/hogstadietekemi/blandningar/separationsmetoder/> [2015-05-31]
- Orring, A. (2013). Pyrolys återvinner kläder. *Ny teknik*, 25 april. http://www.nyteknik.se/.../energi_mi.../miljo/article3682054.ece [2015-05-17]
- Ozen, E., Kiziltas, A., Kiziltas, E.E. & Gardner, D.J. (2013). Natural fiber blend—nylon 6 composites. *Polymer Composites*, 34(4), ss. 544-553.
- Palm, D., Harris, S., & Ekvall, T. (2013). *Livscykelanalys av svenks textilkonsumtion; Underlagsrapport till Naturvårdeverkets regeringsuppdrag om nya etappmål (NV-00336-13)*. Göteborg: IVL Svenska Miljöinstitutet AB.
- Park, J., Park, C. & Jeon, H. (2007). PVC removal from mixed plastics by triboelectrostatic separation. *Journal of hazardous materials*, 144(1), ss. 470-476.
- Personne, H. & Sundin, K. (2013) *Textilt avfall, en framtida resurs – pilotprojekt i Stockholm* (Rapport U2013:15). Stockholm: Avfall Sverige och Stockholms stad
- Sartorius, I. & Krähling, H. (2012). Plastics after Use: Sustainable Management of Material and Energy Resources. I Matyjaszewski, K. & Möller, M. (red.) *Polymer Science: A Comprehensive Reference*. Elsevier B.V.
- Scheirs, J. (1998). *Polymer recycling: science, technology and applications*. Chicester: John Wiley & sons.
- Sharma, V. & Kundu, P.P. (2006). Addition polymers from natural oils—A review. *Progress in Polymer Science*, 31(11), ss. 983-1008.
- Slater, K. (2009). Environmental impact of polyester and polyamide in textiles. Deopura, B.L. Alagirusamy, Joshi, R. M. & Gupta, B. (red.) *Polyesters and Polyamides*. Woodhead Publishing Series in Textiles, ss. 171-199.
- Tejin (u.å.). *Closed-loop Recycling System ECO CIRCLE*. <http://www.tejin.com/solutions/ecocircle/> [2015-04-28]
- Tingsvik, K. (2012). *Compendium in fibre chemistry*. Textilhögskolan i Borås. Borås: Swedish school of textiles.

Upasani, P.S., Jain, A.K., Save, N., Agarwal, U.S. & Kelkar, A.K. (2012). Chemical recycling of PET flakes into yarn. *Journal of Applied Polymer Science*, 123(1), ss. 520-525.

Utbildningsstyrelsen (2013). *Analysmetoder separeringsmetoder*.
<http://www.edu.fi/laboratorieanalyser/analysmetoder> [2015-05-17]

Wang, C., Wang, H. & Liu, Y. (2015). Separation of polyethylene terephthalate from municipal waste plastics by froth flotation for recycling industry. *Waste management (New York, N.Y.)*, 35, ss. 42-47.

Wang, H., Wang, C., Fu, J. & Gu, G. (2014; 2013). Flotability and flotation separation of polymer materials modulated by wetting agents. *Waste management (New York, N.Y.)*, 34(2), ss. 309.

Wang, Y. (2006). *Recycling in textiles*. Cambridge: Woodhead Publishing.

Wikipedia. (2015). Petroleum. <http://sv.wikipedia.org/wiki/Petroleum> [2015-05-07]

Yang, Y., Boom, R., Irion, B., van Heerden, D., Kuiper, P. & de Wit, H. (2012). Recycling of composite materials. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 51, ss.53-68.