

PEHMEÄN POLYURETAANIVAHDON KIERRÄTYSMAHDOLLISUUDET SUOMESSA



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Kestävä kehitys, Forssa

kevät 2022

Aku Kalliomäki

Kestävä kehitys

Tekijä Aku Kalliomäki

Työn nimi Pehmeän polyuretaanivaahdon kierrätysmahdollisuudet Suomessa

Ohjaaja Sanna Hakkarainen

Tiivistelmä

Vuosi 2022

Samaan aikaan kun kiertotalouden merkitys kasvaa, alkaa teollisuuden mielenkiinto vaikeasti kierrätettäviä materiaaleja, kuten polyuretaaneja kohtaan kasvaa. Polyuretaanin monista muodoista tämä työ käsitteli pehmeää polyuretaanivaahtojätettä (FPUF). Työ keskittyi pääosin Suomen tilanteeseen ja mahdollisuuksiin, sillä tällä hetkellä polyuretaania kierrätetään Suomessa vain hyvin vähän. Tähän mennessä vaahdotetun polyuretaanin kierrätykseen Suomessa ei ole ollut selkeitä ratkaisuja, samalla kun kierrätystavoitteet nostavat paineita löytää ratkaisuja polyuretaanijätteen hyötykäyttöön. Työn tavoite oli luoda katsaus polyuretaanin kierrätyksen tilanteeseen ja tulevaisuuden mahdollisuuksiin Suomessa, sekä selvittää ehdot polyuretaanin kierrätyksen kannattavuudelle. Alkuperäinen aihe tuli kierrätettyjä huonekaluja myyvältä yrittäjältä, jolla oli ongelma suurien vahtomuovijättemäärien kanssa.

Työn alussa tehtiin kokeita polyuretaanivaahdon tilavuuden pienentämiseksi. Hydraulinen jätapaalain todettiin nopeasti todennäköisesti parhaaksi vaihtoehdoksi, joten tähän liittyvät tutkimuskysymykset jätettiin pois. Selvitys tehtiin kokoamalla tietoja alan toimijoista, tutkimustuloksista ja raporteista ja haastatteleamalla polyuretaanin kierrätykseen tai kiertotalouteen liittyviä yrityksiä. Haastattelut tehtiin sähköpostitse ja ne sisälsivät erilaisia yksilöityjä kysymyksiä yrityksille. Kysymykset koskivat pääasiassa näkemyksiä polyuretaanin kierrätyksen markkinoihin, tulevaisuudensuunnitelmia ja kierrätysteknologioita.

Koska Suomessa pehmeää polyuretaania ei tuoteta merkittäviä määriä, ei myöskään kemiallisessa kierrätyksessä hyödynnettäviä sivuvirtoja synny. Pisteittäin syntyvä epätasalaatuinen jäte on tehotonta kierrättää kemiallisesti. Tämän hetken realistinen kierrätysvaihtoehto Suomessa ovat mekaaniset kierrätystavat, kuten vaahdonpalojen käyttö sidotussa polyuretaanivaahdossa (bonded polyurethane foam) tai muissa komposiittimateriaaleissa. Sidotusta polyuretaanivaahdosta voi valmistaa monipuolisia tuotteita ja ne on todettu toimivaksi ratkaisuksi muissa maissa, joten näiden pilotointia voisi olla aiheellista yrittää Suomessa. Koska mekaaninen kierrätys ei tarjoa ratkaisuja täysin suljettuun kiertoon, on polyuretaanin kierrätyksen tulevaisuus luultavasti kemiallisessa kierrätyksessä, jonka menetelmät ovat vasta varhaisessa kehitysvaiheessa, joskin ne parantuvat ja tehostuvat jatkuvasti tutkimuksen edetessä.

Avainsanat polyuretaanin kierrätys, kiertotalous, pehmeä polyuretaanivaahdo

Sivut 30 sivua ja liitteitä 0 sivua

At the same time as the importance of the aspect of circular economy grows, more attention is paid to hard-to-recyclable materials, such as polyurethanes. From many forms of polyurethane, this work dealt with flexible polyurethane foam (FPUF) waste focusing on the current state and recycling opportunities in Finland, where polyurethane is still recycled to rather small extent, which may due to the fact that there has been no effective solution on how to recycle PUF so far. Therefore, the aim of this thesis was to provide an overview of the situation and future opportunities for the PUF recycling and waste management as well as future solutions of both chemical and mechanical PUF recycling, aiming at its effective and profitable reutilization in Finland. The key focus of the study was on Finnish industry. The commissioner of the thesis was Häme University of Applied Sciences, but the original subject came from an entrepreneur selling recycled furniture, who had a problem with large amounts of flexible polyurethane waste.

At the beginning of the thesis, experiments were carried out to reduce the volume of polyurethane foam waste towards more efficient transportation. The hydraulic baling press was quickly identified as probably the best option, so the related research questions were omitted. The research was carried out by compiling data on existing solutions, operators, research results, reports and interviewing companies related to the recycling of polyurethane or the circular economy. The interviews were conducted by email and included a variety of specific questions for companies. The questions mainly concerned views on the market for the recycling of polyurethane, future plans and recycling technologies.

Since there are few PUF producers in Finland, no side streams that can be recovered in chemical recycling can be created either. In addition, point-by-point generating unequal waste is difficult to recycle chemically. Therefore, currently the most realistic methods in Finland are mechanical recycling options, such as the use of foam pieces in bonded polyurethane foam or other composite materials. Bonded polyurethane foam can be used to manufacture versatile products, and they have been found to be a viable solution in other countries, so piloting these in Finland could be worth of more detailed study. However, since mechanical recycling does not provide solutions for fully closed cycles, the future potential of polyurethane recycling lies on chemical recycling, the methods of which are still only at an early stage of development although they are constantly improving and intensified by ongoing research.

Keywords Polyurethane recycling, circular economy, flexible polyurethane foam

Pages 30 pages and appendices 0 pages

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Kiertotalous osana kestäväää kehitystä	2
2.1	Kiertotalous	2
2.2	Megatrendit	3
2.2.1	Megatrendi: Jätteiden määrä kasvaa	4
2.2.2	Megatrendi: Kiertotalouden merkitys kasvaa	5
2.3	Kiertotaloutta ohjaava lainsäädäntö	6
2.4	Muovien kierrätys	8
3	Polyuretaani	10
3.1	Polyuretaanijätteen lähteet	10
3.2	Polyuretaanien kierrätyksen ongelmat ja haasteet	11
3.3	Mekaaninen kierrätys kierrätysvaihtoehtona	12
3.4	Kemiallinen kierrätys kierrätysvaihtoehtona	13
3.5	Energiahödyntäminen	15
4	Tutkimusongelman esittely	16
5	Aineisto ja menetelmät	18
6	Laboratoriokokeet	18
6.1	Mekaaniset kokeet	19
6.2	Kemialliset kokeet	20
6.3	Vakuumpakkaaminen	22
7	Selvityksen tulokset	23
7.1	Polyuretaanin kierrätyksen tilanne maailmalla	23
7.2	Polyuretaanin kierrätyksen tilanne Suomessa	25
8	Johtopäätökset	26
8.1	Tämän päivän haasteet	26
8.2	Mahdollisuudet	27
8.3	Tulevaisuus	29
	Lähteet	31

1 Johdanto

Kiertotalouden merkityksen kasvaessa teollisuuden huomio alkaa vähitellen kiinnittyä vaikeasti kierrätettävien materiaalien kierrätykseen ja uusiokäyttöön. Polyuretaanien kirjo ei ole poikkeus tästä kehityksestä, ja viime aikoina etenkin kemiallisen kierrätyksen tutkimus on alkanut etsiä keinoja polyuretaanijätteen suljettuun kiertoon. Polyuretaani on monipuolinen polymeeri, jonka rakenne voi valmistustavasta riippuen olla lähes mitä vain synteettisen kumin ja kovan tai pehmeän vaahdon väliltä. Kertamuovina se on kuitenkin muovaamatonta ja siten haastava kierrätettävä. Tämä työ keskittyy pääosin pehmeän polyuretaanivaahdon, tuttavallisemmin vaahtomuovin kierrätykseen.

Enimmäkseen huonekalujen pehmusteissa ja patjoissa käytettävä pehmeä polyuretaanivaahdo on yksi suurimmista polyuretaanijätteen lähteistä maailmalla, Suomi mukaan lukien. Tällä hetkellä niin maailman kuin Suomenkin polyuretaanijätteestä valtaosa päätyy kaatopaikoille tai energiantuotannon polttoaineeksi, ja vain pieni osa saadaan kierrätettyä, sekin suurimmaksi osaksi mekaanisesti. Suomessa pehmeää polyuretaanivaahdo ei teollisessa mittakaavassa kierrätetä tiettävästi lainkaan, vaan kaikki vaahtomuovijäte päätyy poltettavaksi. Tämän työn tarkoituksena on selvittää, millaiset mahdollisuudet pehmeän polyuretaanivaahdon kierrätykselle Suomessa on nyt ja tulevaisuudessa. Tutkimuskysymyksiin kuuluu edellisten lisäksi kierrätyksen kannattavuusehtojen selvittäminen.

Alun perin työn aihe tuli kierrätettyjä huonekaluja ostavalta, kunnostavalta ja myyvältä yrittäjältä, jolla polyuretaanijätettä syntyi paljon ja sen kuljettaminen sellaisenaan oli kallista. Työn alussa pyrittiinkin kierrätysmahdollisuuksien lisäksi etsimään ratkaisuja myös vaahtomuovin tilavuuden pienentämiseksi kemiallisesti tai mekaanisesti ilman jätapaalainta, jotta se veisi vähemmän tilaa kuljetettaessa. Tähän liittyvistä tutkimuskysymyksistä luovuttiin, sillä teollinen jätapaalain pystyttiin toteamaan parhaaksi tai ainakin yleisimmin käytössä olevaksi tavaksi tilavuuden pienentämiseksi. Aiheesta tehdyt laboratoriokokeet ja niiden tulokset on kuitenkin esitetty omassa luvussaan.

Kierrätykseen liittyvä selvitys tehtiin perehtymällä alan nykytilanteeseen ja uusimpiin tutkimustuloksiin sekä haastatteleamalla polyuretaanin kierrätyksen kanssa tekemisissä olevia yrityksiä sekä tiettyjä suomalaisia kiertotalouteen ja kierrätykseen liittyviä yrityksiä. Johtopäätöksissä pohditaan alan tulevaisuudennäkymiä sekä esitetään selviyksen pohjalta parhaiksi ja realistisimmiksi nousseet kierrätysvaihtoehdot, joiden pilotointia Suomessa voisi olla syytä yrittää.

2 Kiertotalous osana kestäväää kehitystä

Kestävä kehitys jaetaan yleensä kolmeen ulottuvuuteen: sosiaaliseen, taloudelliseen ja ekologiseen. Jokainen ulottuvuus tarkoittaa omalla alallaan sitä, että yhteiskunnan rakenteet ja toiminta perustuisivat malliin, jolla olisi toimintaedellytykset ja joka olisi eettisesti kestävä myös pitkällä aikavälillä. Käytännössä tämä tarkoittaa muun muassa ihmisten sosiaalisen aseman turvaamista, talousjärjestelmän vakautta ja tuloerojen tasaamista sekä luonnonvarojen käyttöä niin, että se on linjassa luonnonvarojen uusiutumisen kanssa. Todellisuudessa kestävä kehityksen ulottuvuudet ovat toisiinsa nivoutuneita ja välillä vaikea erottaa toisistaan. Monilla kestävä kehityksen haasteista, kuten ilmastonmuutoksella, onkin samaan aikaan suoria tai epäsuoria vaikutuksia useampaan ulottuvuuteen. (Ympäristöministeriö, n.d.; Valtioneuvoston kanslia, n.d.)

2.1 Kiertotalous

Niin ikään kiertotalouden merkityksen voi helposti nähdä koskettavan kaikkia kolmea ulottuvuutta (ekologinen, taloudellinen ja sosiaalinen), joista lähimmin kenties ekologista ja taloudellista ulottuvuutta. Kiertotaloudella tarkoitetaan talousjärjestelmää, jolla pyritään luonnonvarojen kestävään käyttöön korostamalla erilaisten materiaalien, esineiden ja komponenttien kierrätystä ja uusiokäyttöä sekä laajemmin esimerkiksi edistämään jakamislustoja, uusiutuvia energiamuotoja ja tuotteiden elinkaaren pidentämistä (Sitra, n.d.; Euroopan parlamentti, 2020). Kiertotalouden yksi keskeisimpiä tavoitteita on luoda materiaalikiertoja, jossa sivuvirrat ja jätteeksi päätyneet tuotteet raaka-aineineen pyritään hyödyntämään uusien tuotteiden valmistamisessa niin, että neitseellisiä raaka-aineita tarvitaan mahdollisimman vähän tai ei lainkaan. Materiaalikierron toteutuminen vaatii sekä

toimivan kierrätysjärjestelmän että kehittynyttä tuotesuunnittelua, jossa tuote suunnitellaan sekä helposti kierrätettäväksi että kierrätysmateriaaleista valmistettavaksi (Ahola ym., 2020). Tämä johtaa ideaalilanteessa siihen, että monet vaikeasti kierrätettävät materiaalit vähitellen korvataan helpommin kierrätettävissä olevilla materiaaleilla (Syke, 2018). Helpoimmin kierrätettävien materiaalien kohdalla kiertotalous on jo suuressa roolissa. Esimerkiksi kierrätetyn teräksen määrä koko Euroopan terästuotannosta on jo yli puolet (Teräsrakenneyhdistys, n.d.). Sen sijaan vaikeammin kierrätettävät materiaalit jätteenä päätyessään saatetaan edelleen hyödyntää ainoastaan energiana tai sijoittaa kaatopaikalle, vaikka näille teoriassa olisikin löydettävissä käyttökohteita. Tämä johtuu monien materiaalien kohdalla toistaiseksi infrastruktuurin, kuten lajittelun ja kierrätysteknologian puutteellisuudesta ja markkinoiden pienuudesta. Esimerkkinä tästä ovat monet muovityypit, sillä muovien kierrätykseen on alettu kiinnittämään huomiota verraten myöhään ja markkinoita kierrätetylle muoville ei monissa tapauksissa vielä ole tai materiaalia syntyy niin vähän, ettei sille ole kannattavaa luoda kierrätysjärjestelmää (Järvelä & Järvelä, 2015; Suomen Uusiomuovi, n.d.b). Kiertotalousajattelun yksi ilmiö onkin joukko uusia yrityksiä, joiden toimintamalli perustuu jonkin tietyn, monesti aiemmin kierrätyskelvottomana pidetyn jätelajin hyödyntämiseen (Harmaala, 2021). Eräissä tapauksissa materiaali on silti järkevämpää hyödyntää energiana, kuten kotitalouksien likainen pakkausmuovi, jonka pesemisen ennen kierrätystä katsotaan kuormittavan ympäristöä enemmän kuin polttaminen energiaksi (RINKI, n.d.).

2.2 Megatrendit

Megatrendeilla tarkoitetaan pitkän aikavälin globaaleja, suuria ja hitaita muutoksia ja ilmiöitä, jotka usein liittyvät toisiinsa ja joita pystytään havaitsemaan ja ennustamaan nykyajassa. Tällä hetkellä käynnissä olevia megatrendejä ovat esimerkiksi ilmaston lämpeneminen, syntyvyyden lasku ja digitalisaation laajeneminen. Megatrendien tunnistamisella pyritään helpottamaan tulevaisuuden hahmottamista ja siihen liittyviä suuria kokonaisuuksia, jotka on syytä ottaa huomioon tulevaisuuteen liittyvässä suunnittelussa. Etenkin kansallisessa päätöksenteossa tämänlainen kauaskatseisuus on tärkeää säilyttää, jotta tehdyt ratkaisut olisivat kestäviä ja soveltuisivat tulevaisuuden erilaiseen maailmaan. (Sitra, 2020)

Tämän työn taustojen avaamisessa hyödynnetään Sitran (Suomen itsenäisyyden juhlarahasto) näkemystä megatrendeistä. Sitra on Suomen merkittävin megatrendien listaaja ja julkaisija, joka käsittelee megatrendejä pääasiassa Suomen näkökulmasta. Sitra on laatinut vuonna 2020 päivittyneen katsauksen 56:een parhaillaan käynnissä olevaan megatrendiin, joista jokainen voidaan liittää yhteen tai useampaan viidestä teemasta. Sitran luettelemat megatrendien viisi tärkeintä teemaa ovat seuraavat:

1. Ekologisella jälleenrakennuksella on kiire
2. Väestö ikääntyy ja monimuotoistuu
3. Verkostomainen valta voimistuu
4. Teknologia sulautuu kaikkeeusjärjestelmä etsii suuntaansa

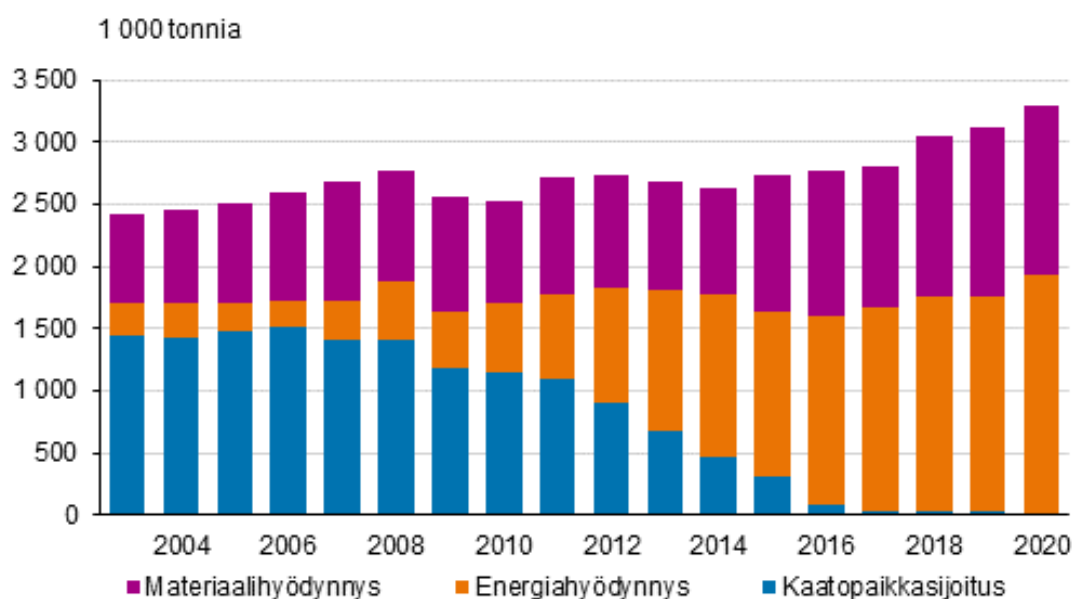
Käsillä olevan opinnäytetyön aihe kytkeytyy ennen kaikkea ekologisen jälleenrakentamisen megatrendeihin. Tässä kategoriassa työn aihetta koskettaa suoraan kaksi merkittävää ja toisiinsa vahvasti liittyvää megatrendiä: jätteiden määrän kasvaminen ja kiertotalouden merkityksen kasvaminen. (Sitra, 2020)

2.2.1 Megatrendi: Jätteiden määrä kasvaa

Jätteiden määrän kasvu on selkeästi hahmotettavissa oleva megatrendi joka on jatkunut jo vuosikymmeniä, eikä jätteiden määrän odoteta vähenevän lähitulevaisuudessa. Vuonna 2020 Suomessa kertyi 3 296 tuhatta tonnia yhdyskuntajätettä, eli noin 596 kiloa asukasta kohden, kun vuonna 2003 kertymä oli 2 356 tuhatta tonnia eli lähes miljoona kiloa vähemmän (kuva 1). Ennen orgaanisten jätteiden kaatopaikkakieltoa valtaosa Suomen yhdyskuntajätteistä päätyi kaatopaikoille, mutta vuodesta 2012 asti jätteiden merkittävin käsittelytapa on ollut energiahyödyntäminen. Vuodesta 2016 kiellon astuttua voimaan on kaatopaikkasijoitukseen päätynyt vain marginaalinen osa yhdyskuntajätteistä. Vuonna 2020 yhdyskuntajätteestä hyödynnettiin energiana 58 %. Lähes kaikki jäljelle jäävästä osuudesta (42 %) hyödynnettiin materiaalina. (Tilastokeskus, 2021)

Jätteiden kasvava määrä kuormittaa jätteenkäsittelyä ja energiahyödyntämisen suuri osuus lisää neitseellisen materiaalin tarvetta materiaalikierrossa. Tämä tulee kasvattamaan kiertotalouden merkitystä.

Kuva 1 Jätteiden määrän kasvu ja käsittelytapojen jakautuminen vuosien 2003 ja 2020 välisenä aikana (Tilastokeskus, 2021).



2.2.2 Megatrendi: Kiertotalouden merkitys kasvaa

Jättemäärien jatkuvasti kasvaessa sekä taloudellisen ja ekologisen kestävän kehityksen yhteensovittamisessa kiertotaloudella on merkittävä rooli, joka tulee voimistumaan mitä pidemmälle vastuullisuuskysymykset, kulutustottumukset ja lainsäädäntö kehittyvät. Kiertotalouden uskotaan olevan tulevaisuudessa ensisijainen talousmalli ja edellytys ekologiselle kestävyydelle, kuten luonnonvarojen riittämiselle ja päästöjen hillitsemiselle. (Euroopan parlamentti, 2020; Sitra, n.d.)

Kiertotalouden merkityksen kasvu on jo nähtävissä yritysten toiminnassa. Uusien kiertotalousyrittäjien lisäksi yhä useampi suuryritys on alkanut kiinnittämään huomiota toimintansa ja tuotteidensa ympäristövaikutuksiin ja elinkaareen. Sitra on vuodesta 2017 ylläpitänyt listaa kiinnostavimmista Suomalaisista kiertotalousyrityksistä ja muista yrityksistä,

jotka ovat ottaneet kiertotalouden jo osaksi liiketoimintaansa. Tällaisia yrityksiä ovat mm. enenevissä määrin kierrätysmuovia tuotteissaan hyödyntävä Orthex ja havusellusta muovin kaltaista, mutta helposti kierrätettävää pakkausmateriaalia valmistava Paptic.

Tulevaisuudessa kiertotalouteen pyrkiminen voidaan nähdä tärkeänä imagokysymyksenä ja jo lainsäädännönkin ohjaamana välttämättömyytenä. (Sitra, 2021)

2.3 Kiertotaloutta ohjaava lainsäädäntö

Kiertotaloutta ohjaa sekä Suomen lainsäädäntö että EU:n tasolta tulevat tavoitteet ja direktiivit, joiden täyttämiseen ja noudattamiseen Suomi on osaltaan sitoutunut. Euroopan unionin direktiivi 2008/98/EY jätteistä ja tiettyjen direktiivien kumoamisesta astui voimaan vuonna 2010 ja siihen kohdistunut muutosdirektiivi 2018/851 vuonna 2020. Direktiivien tarkoituksena on vahvistaa jätteiden ehkäisemistä ja siihen liittyviä sääntöjä muun muassa asettamalla Euroopan unionin jäsenmaille yhteisiä kierrätystavoitteita, laajentamalla tuottajavastuuta ja ottamalla käyttöön jätehierarkia. (Euroopan parlamentti, 2018)

Kierrätystavoitteet asetetaan jokaiselle jätelajille erikseen painon mukaan, minkä lisäksi on kokonaistavoite, joka koskee kaikkea yhdyskuntajätettä. Ensimmäiset kierrätystavoitteet on asetettu vuodelle 2025, jonka jälkeen ne kiristyvät viiden vuoden välein. Vuonna 2025 kaiken yhdyskuntajätteen kierrätystavoite on 55 %, mikä Suomen kohdalla tarkoittaa 13 prosenttiyksikön lisäystä nykyiseen 42 % kierrätysasteeseen. Vuonna 2030 tavoite on 60 % ja vuonna 2035 65 %. Pelkän pakkausjätteen kierrätystavoitteet on vielä erikseen 10 % korkeammat ja niissä tavoitteita on asetettu materiaalikohtaisesti (taulukko 1, s. 7). Monien yksittäisten jätelajien osalta tavoitteet on Suomessa jo saavutettu, mutta ainakin muovin osalta tavoitteeseen on vielä matkaa, vaikka kierrätysaste näillä näkymin saavutetaankin. Pakkausmuovijätteen tilastointi on haastavaa, mutta vuonna 2017 sen kierrätysasteen on arvioitu olevan noin 30 %, joka sisältää pantilliset muovit, joiden kierrätysaste ylittää 90 %. Kierrätystavoite pakkausmuoville on 50 % vuonna 2025 ja 55 % vuonna 2030. Kierrätystavoitteita koskeva uusi lainsäädäntö astui voimaan asteittain vuonna 2021. (Ympäristöministeriö, 2021; Tilastokeskus, 2021; Euroopan parlamentti, 2018; Suomen Uusiomuovi, 2019)

Taulukko 1. Pakkausjätteen kierrätystavoitteet EU:n jäsenmaille (Euroopan parlamentti, 2018).

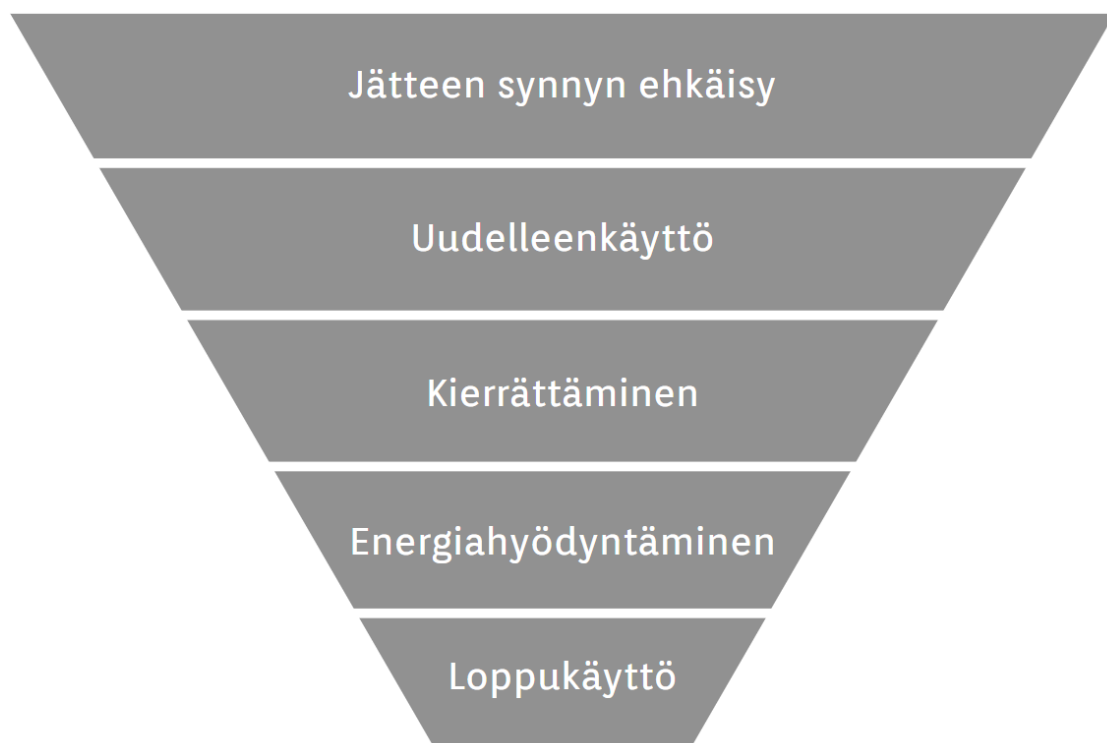
	Vuoteen 2025 mennessä	Vuoteen 2030 mennessä
Kaikki pakkausjäte	65 %	75 %
Muovi	50 %	55 %
Puu	25 %	30 %
Rautametallit	70 %	80 %
Alumiini	50 %	60 %
Lasi	70 %	75 %
Paperi ja kartonki	75 %	85 %

Euroopan unionin jäsenmaiden jätteitä koskevaa päätöksentekoa ja koko kiertotaloutta ohjaa niin sanottu jätehierarkia, joka priorisoi jätteen syntymisen ja käsittelyn keinot (kuva 2). Jätehierarkiassa korkeimmalla olevat käsittelytavat ovat ensisijaisia, ja mikäli niitä ei pystytä toteuttamaan, pyritään ratkaisua hakemaan seuraavalta hierarkian asteelta. Ensisijaisena tavoitteena on ehkäistä jätteen syntyä, joka tarkoittaa käytännössä tuotteiden ja pakkausten suunnittelua ja valmistamista niin, että niistä päätyisi jätteeksi mahdollisimman vähän materiaaleja. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi pakkausmateriaalin minimointia ja tuotteen eliniän maksimointia. Seuraavana hierarkiassa on löytää jätteeksi päätyneelle tuotteelle tai materiaalille uusiokäyttökohde sellaisenaan. Jos uusiokäyttö ei onnistu, tulee tuotteen sisältämät materiaalit erotella ja kierrättää uusien tuotteiden valmistamiseen. Mikäli tämäkään ei ole mahdollista, tulee materiaali hyödyntää polttamalla energiantuotannossa. Hierarkian viimeisenä on loppukäyttö, eli usein kaatopaikkasijoitus,

johon Suomessa päätyy käytännössä enää osa epäorgaanisesta jätteestä (Tilastokeskus, 2021).

Jätehierarkian toteutumiseksi voidaan asettaa ja on asetettu kannustimia, kuten jätteenpoltto- ja kaatopaikkamaksuja muita järjestelmiä, joilla hierarkian noudattamisesta tulee taloudellisesti kannattavaa. Näin myös hankalasti kierrätettävät materiaalit saadaan paremmin kiertotalouden piiriin.

Kuva 2. EU:n jätehierarkia (mukaillen Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2008/98/EC).



2.4 Muovien kierrätys

Laajamittainen kotitalouksien muovinkierrätys on Suomessa verraten uusi ilmiö, mutta muovien kierrätystä on harjoitettu teollisuudessa jo ennen vuoden 2016 tuottajavastuulain muutosta. Esimerkiksi Suomen pullonpalautusta hoitava Palpa Oy on jo vuodesta 2008 asti kierrättänyt PET-muovia pantillisista juomapulloista, joiden materiaalista on tehty uusien pullojen ohella esimerkiksi vaatteita. Kuluttajien muovipakkauksesta Suomessa huolehtii

muovipakkausten tuottajayhteisö Suomen Uusiomuovi Oy. Tällä hetkellä kaikki kuluttajien muovipakkaukset kierrätetään Fortumin muovijalostamolla Riihimäellä. (Suomen Palautuspakkaus, n.d.; Suomen Uusiomuovi, n.d.b; Fortum, n.d.)

Muovia voidaan kierrättää sekä mekaanisesti että kemiallisesti. Mekaanisessa kierrätyksessä muovi pestään ja rouhitaan pieneksi silpuksi, josta useiden muovilajien yhdistelmänä valmistetaan useimmiten granulaattia, jota käytetään sellaisenaan uusien muovituotteiden valmistukseen. Kemiallisessa kierrätyksessä muoviaines palautetaan takaisin lähtöaineeksi eli monomeereiksi tai joksikin välivaiheista, joka mahdollistaa ominaisuuksiltaan täysin tai lähes neitseellistä vastaavan uusiomuovin valmistamisen. Tällä hetkellä mekaaninen kierrättäminen on kuitenkin pääasiallinen menetelmä ja Suomessa ainoa käytössä oleva kotitalouden pakkausmuovien käsittelytapa. Kemiallinen kierrätys vaatii toimiakseen suuria raaka-ainemääriä ja kalliita investointeja, eikä se ole vielä laajamittaisesti käytössä Keski-Euroopan ulkopuolella. On kuitenkin arveltu, että muovijätteen kierrätysmäärän ja -tavoitteiden kasvaessa kemiallinen kierrätys on tulevaisuudessa otettava osaksi muovinkierrätystä etenkin teknisten ja muiden hankalasti mekaanisesti kierrätettävien muovityyppien ja epäpuhtaan muovin osalta. (Suomen Uusiomuovi, n.d.b; Roschier ym. s. 34, 2020; Plastics Europe, n.d.)

Yksi isoimmista ongelmista muovien kierrätyksessä on niiden suuri kirjo. PET- PE- ja PP-muovit soveltuvat erinomaisesti kierrätettäväiksi, mutta esimerkiksi PVC-muovin kierrätysmahdollisuudet ovat erittäin rajalliset sen sisältämän kloorin vuoksi. Lisäksi eri muovityyppien erotteleminen kierrätysprosessissa on haastavaa. Vaikka monet muovityypit voidaan kierrättää keskenään, lopputulos ei ole homogeeninen eikä siksi sovellu kaikkiin niihin käyttökohteisiin mihin neitseellinen muovi eri tyytit ominaisuuksineen pystyvät. Haasteita tuo myös muovityypit, joiden rakenne hankaloittaa niiden kierrättämistä, kuten keveytensä takia vaikeasti käsiteltävä vaahdotettu polystyreeni tai kertamuovit, jotka eivät muovaudu granulaateiksi. Vaikeimmissa muovityypeissä kierrätettävyyttä hankaloittaa useampi mainituista ominaisuuksista. (Eskelinen ym., 2016; Järvinen & Järvinen, 2015, s. 21; Muoviteollisuus ry, n.d.; Leomuovi, n.d.; Hsy, n.d.)

3 Polyuretaani

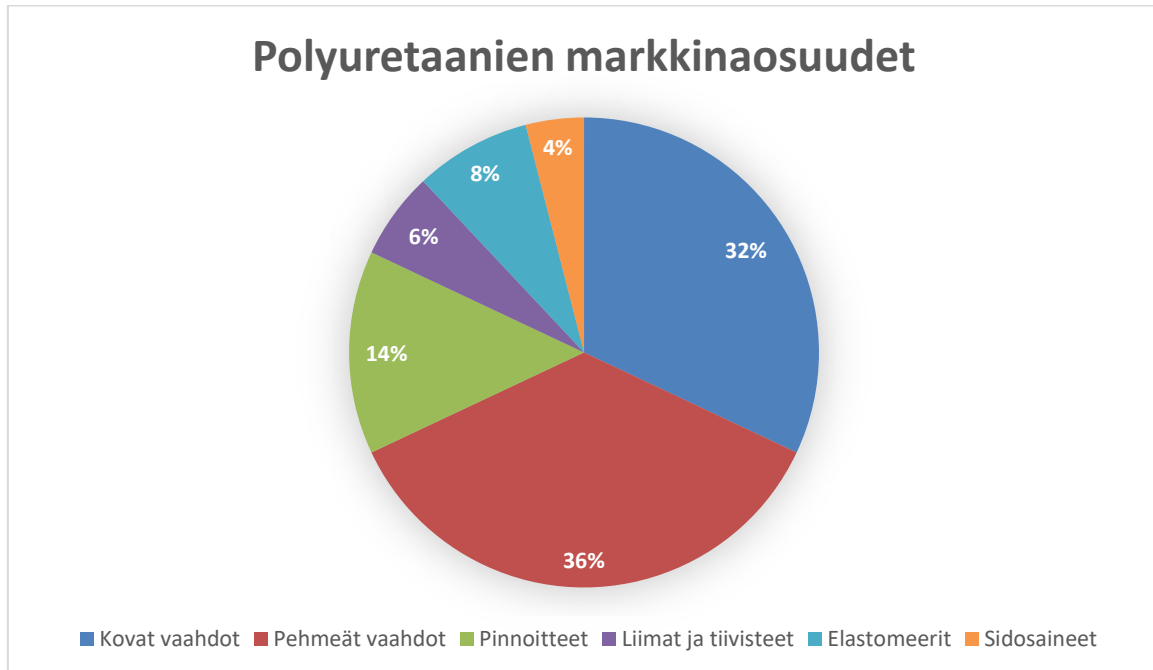
Polyuretaanit ovat joukko synteettisiä polymeerejä, jotka syntyvät kahden pääraaka-aineen, polyolin ja isosyanaatin reaktiosta. Käytettävän polyolin, isosyanaatin ja lisäaineiden valinnalla voidaan vaikuttaa polyuretaanin ominaisuuksiin ja rakenteeseen halutulla tavalla, jonka vuoksi myös polyuretaanin kemiallinen kaava vaihtelee. Polyuretaanit ovat kertamuoveja, eli niitä ei valmistusprosessin jälkeen voi muovata mekaanisesti tai lämmön avulla, vaan niiden rakenne säilyy samanlaisena niin kauan kunnes se rikotaan kemiallisesti. Yleisimmät polyuretaanityypit ovat erilaiset polyesteri- tai polyeetteripohjaiset vaahtomuovit, jotka voivat olla rakenteeltaan kovia (joustamattomia) tai pehmeitä (joustavia). Myös monet synteettiset kumit valmistetaan polyuretaanista, jonka lisäksi polyuretaaneja käytetään laajasti esimerkiksi liimoissa ja maaleissa. (TPC, 2020)

Polyuretaanien suuren kirjon vuoksi ne joudutaan kierrätettäessä käsittelemään eri materiaaleina. Lisäksi jätteen syntypaikat vaihtelevat laajasti (Kemona & Piotrowska, 2020). Kovaa polyuretaanivaahtoa käytetään lähinnä eristeenä rakennusteollisuudessa ja kylmälaitteissa. Pehmeää polyuretaanivaahtoa käytetään eri tiheyksisinä monenlaisissa pehmusteissa, kuten huonekaluissa ja patjoissa. Lisäksi pehmeästä polyuretaanista valmistetaan esimerkiksi pesusieniä, pakkausmateriaalia ja äänieristeitä.

3.1 Polyuretaanijätteen lähteet

Polyuretaanin monista käyttökohteista johtuen siitä syntyy monenlaista jätettä useista lähteistä. Syntyvän polyuretaanijätteen määrää ei suoraan tilastoida, mutta tuotantomäärien avulla voidaan luoda arvio jätteeksi päätyvän polyuretaanin määrästä. Euroopan, Lähi-Idän ja Afrikan yhteisessä tilastossa suurimmat tuotantomäärät ovat pehmeällä ja kovalla polyuretaanivaahdolla, jotka muodostavat kumpikin noin kolmasosan markkinoista (kuva 3). Jäljelle jäävistä osuuksista suurimman muodostaa pinnoitteet, joihin sisältyy mm. polyuretaanipohjaiset lattiapinnoitteet ja maalit. Loput markkinoista muodostuu liimoista, tiivisteaineista, sidosaineista ja elastomeereistä, kuten synteettisestä kumista. Markkinaosuudet ovat hyvin samankaltaiset kautta maailman. (Kemona & Piotrowska, 2020)

Kuva 3. Erilaisten polyuretaanityyppien markkinaosuudet Euroopassa, Lähi-Idässä ja Afrikassa (IAL Consultants, 2018).



Pehmeän polyuretaanivaahdon tuotannosta arviolta noin 50 % on huonekalujen pehmusteita ja noin 35 % patjoja. Pehmeiden polyuretaanivaahdojen tuottajien yhdistys EUROPUR:in julkaisemasta raportista käy ilmi, että pelkästään EU:n alueella jätteeksi päättyy joka vuosi noin 40 miljoonaa polyuretaanipatjaa. Raportin arvioiden mukaan huonekaluista ja patjoista päättyy jätteeksi vuosittain noin 600-700 tuhatta tonnia vaahtomuovijätettä. (EUROPUR, 2021)

3.2 Polyuretaanien kierrätyksen ongelmat ja haasteet

Materiaalina vaahdotetussa polyuretaanissa yhdistyy kierrätyksen kannalta ainakin kaksi merkittävää ongelmaa. Ensinnäkin vaahdotettuja polyuretaanityyppejä on useita, jonka seurauksena materiaalit eroavat toisistaan sekä kemiallisesti että rakenteellisesti.

Esimerkiksi kova, eristetyyppinen polyuretaanivaahdo ei ole kierrätettäessä yhteensopiva pehmeän polyuretaanivaahdon kanssa. Mekaanisessa kierrätyksessä näiden käyttökohteet onkin usein erilaiset, ja kemiallisestikin kierrätettäessä nämä käsitellään yleensä toisistaan erillään. (Lardiés, 2020; Kemoni & Piotrowska, 2020)

Toinen haaste on polyuretaanin muovaamattomuus. Kertamuovina polyuretaania ei voi muovata uudelleen esimerkiksi lämmön avulla, jonka vuoksi sitä ei voi sulattaa granulaateiksi useiden muiden kierrätettävien muovien tapaan. Kierrätysmenetelmät ovat siis rajatumpia, sillä vaihtoehtoisiksi jää kallis kemiallinen kierrätys ja mekaaninen uudelleenkäyttö, jossa polyuretaani yleisimmin jauhetaan pieneksi muruksi tai jauhoksi (kuva 4), josta käytetään nimeä micronized polyurethane (MPU) tai suuremmaksi lastuksi ja käytetään esimerkiksi öljynsidonta-aineena ja kokolattiamattojen pehmusteena. (Casey, 2020; Mobius Technologies, n.d.; Isopa, 2020; Carpet Cushion Council, n.d.)

Kuva 4. Kovaa polyuretaanivaahtoa jauhettuna (Mobius Technologies, n.d.).



Muina ongelmina ovat esimerkiksi polyuretaanin matala leimahtamispiste ja etenkin kovan polyuretaanivaahdon sisältämät kemikaalit, kuten vaahdottamiseen käytetyt CFC-yhdisteet, jotka edelleen joudutaan kierrätettäessä poistamaan vanhasta polyuretaanijätteestä. (Zevenhoven, 2004)

3.3 Mekaaninen kierrätys kierrätysvaihtoehtona

Erilaiset mekaanisen kierrätyksen muodot ovat tällä hetkellä polyuretaanijätteen pääasiallinen kierrätystapa, vaikka valtaosa jätteestä päätyykin edelleen energiaksi tai kaatopaikalle. Kuten kemiallisessa kierrätyksessä, mekaanisessakin kierrätyksessä eri

polyuretaanityypit kierrätetään eri tavoin ja usein eri yritysten toimesta. Tämä on sikälkin luonnollista materiaalin erojen lisäksi, että eri tyyppisten polyuretaanijätteiden lähteet ovat erilaisia ja materiaalivirrat valmiiksi homogeenisiä. (EUROPUR, 2016)

Polyuretaanijätteen mekaanisen kierrätyksen edut kemialliseen kierrätykseen nähden ovat sen matalakustanteisuus ja suhteellisen laajat käyttömahdollisuudet. Usein kohteissa, joissa käytetään mekaanisesti kierrätettyä polyuretaania, ei materiaalin tarvitse olla täysin tasalaatuista. Käyttökohteita löytyy niin jauhetulle polyuretaanille kuin suuremmille lastuille. Mekaanisesti kierrätetty polyuretaani on kuitenkin monesti soveltumatonta uudelleenkierrätykseen, sillä kierrätetty polyuretaani käytetään usein muiden materiaalien kanssa täyteaineena tai erilaisten komposiittimateriaalien valmistukseen. Tällaisista materiaaleista polyuretaania on hyvin vaikeaa tai mahdotonta eritellä jälleen kierrätettäväksi, ja siksi mekaaninen kierrätys tarjoaa polyuretaanin elinkaareen vain yhden välivaiheen lisää eikä se siis juurikaan vähennä neitseellisen polyuretaanin tarvetta isossa kuvassa. Kierrätettyä polyuretaania sisältävät komposiittimateriaalit ja muut tuotteet voivat johonkin pisteeseen asti olla mekaanisesti kierrätettävissä tai uudelleenkäytettävissä, mutta ennen pitkää niidenkin elinkaari päättyy energiahyödyntämiseen tai kaatopaikalle. (Dong ym., 2012)

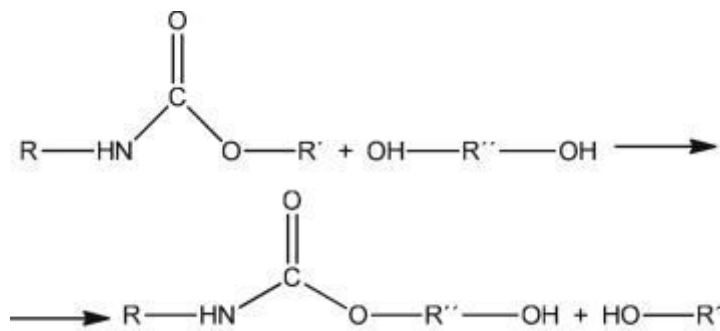
3.4 Kemiallinen kierrätys kierrätysvaihtoehtona

Kemiallinen kierrätys tarjoaa mahdollisuuden polyuretaanin suljettuun materiaalikiertoon. Täysin puhdas vaahdosta vaahdoksi -kierrätys tuottaa kuitenkin haasteita, sillä tasalaatuisten ja -tyyppisen polyuretaanivaahtojätteen volyymit eivät yleensä riitä taloudellisesti kannattavan toiminnan ylläpitämiseen (Behrendt & Naber, 2009). Tämän vuoksi kemiallisesti kierrätetyt polyolit ovat harvoin täysin neitseellistä vastaavia, ja niitä voidaan käyttää korvaamaan neitseellisiä polyoleja vain tiettyyn rajaan asti vaikuttamatta lopputuotteen laadullisiin ominaisuuksiin (Kraitape & Thongpin, 2016; Fulev & Skokova, 2013).

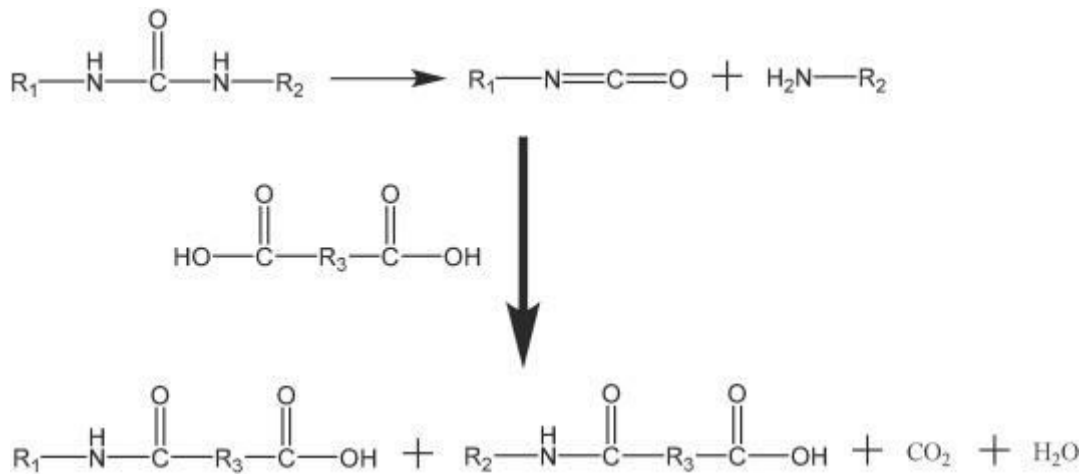
Kemialliseen kierrätykseen on tarjolla useita menetelmiä, jotka soveltuvat eri tavoin eri polyuretaanityypeille. Pehmeän polyuretaanivaahdon kemiallisen kierrätyksen kaupallisessa käytössä olevat menetelmät ovat glykolyysi (kuva 5), jossa katalyyttinä toimii glykolit, ja

asidolyysi (kuva 6), jossa materiaali hajotetaan happojen avulla. Näistä kahdesta glykolyysi on tällä hetkellä käytössä laajemmin, mutta viime aikoina myös asidolyysin kehityksestä on saatu tuloksia, joiden perusteella sitä pidetään lupaavimpana vaihtoehtona pehmeiden polyuretaanivaahtojen kemialliselle kierrätykselle (Gradadolnik ym., 2022; Gama ym., 2020). Lisäksi on testattu useita muita menetelmiä, joista hydrolyysi on edennyt pilotoinnin asteelle. Sillä ei ole kuitenkaan tähän asti katsottu olevan taloudellisia edellytyksiä menestyä sen suuren energiatarpeen vuoksi, joskin tätäkin menetelmää kehitellään jatkuvasti. Glykolyysissä ja asidolyysissä polyuretaanista saadaan kierrätystä varten eroteltua polyolit, mutta isosyanaattien sisältämiä materiaaleja ei kaupallisessa toiminnassa vielä saada hyödynnettyä. Kaikki materiaalit talteen ottavia prosesseja on kuitenkin jo kehitetty ja pilotoitu, joista ainakin glykolyysin ja hydrolyysin yhdistelmästä (hydroglykolyysi) löytyy myönteisiä tuloksia pehmeän polyuretaanivaahdon osalta. Kemiallisen kierrätyksen kehitys ja tutkimus on joka tapauksessa vielä kesken, ja vasta tulevaisuudessa voidaan nähdä, millä menetelmillä on taloudellisia edellytyksiä menestyä. (Anace, n.d.; Covestro, 2021; Evonik, 2021; Gradadolnik ym., 2022; Kemonia & Piotrowska, 2020; Kiss ym., 2021; Zahedifar ym., 2021)

Kuva 5 Pehmeän polyuretaanivaahdon glykolyysireaktio. (Simón ym., 2015)



Kuva 6 Pehmeän polyuretaanivaahdon asidolyysireaktio. (Gama ym., 2020)



3.5 Energiahyödyntäminen

Toistaiseksi polyuretaanijätteen lähes yksinomainen käsittelytapa on poltto energiaksi joko jätteenpolttolaitoksissa tai rinnakkaispolttolaitoksissa. Polyuretaanilla muiden polymeerien tapaan on lähtökohtaisesti korkea energiasisältö; lähes yhtä suuri kuin polttoöljyllä. Tämän vuoksi polyuretaanijäte on hyvää materiaalia energiantuotannon näkökulmasta. Muovijätteen, kuten muunkin jätteen energiahyödyntäminen lisäksi vähentää mm. ympäristölle haitallisemman kivihiilen tarvetta. (Abnisa ym., 2017)

Jätteen energiahyödyntämisessä on tiettyjä haittapuolia, joiden vuoksi sen sijoittuminen jätehierarkiassa on matalalla. Tärkein syy on, että jätteiden polton ei katsota noudattavan

kiertotalouden periaatteita. Kun jäte poltetaan, sen sisältämä materiaali poistuu materiaalikierrosta. Tämä lisää neitseellisen materiaalin tarvetta niissä tuotteissa, joissa kierrätettyä materiaalia olisi voitu hyödyntää ja näin ollen luonnonvaroja kuluu turhaan.

Toinen merkittävä syy on jätteiden polttamisesta syntyvät päästöt ja materiaalista riippuen myös myrkylliset yhdisteet, jotka pitää kerätä prosessissa talteen mahdollisimman kattavasti. Lisäksi polttamisesta syntyy tuhkaa ja kuonaa, jonka määrä vastaa 20-30 % poltettavan jätteen painosta ja vaatii omat käsittelytapansa. Kuonasta pystytään erottelemaan metalleja ja mineraaleja hyötykäyttöön, mutta tuhka saattaa sisältää myrkyllisiä aineita ja sen käyttökohteet ovat rajatumpia. (Bang & Bonsomer Group Oy, 2021; Salovaara, 2017; Suomen Uusiomuovi Oy, n.d.a; University of Alicante, n.d.; Kaartinen ym., 2010)

4 Tutkimusongelman esittely

Opinnäytetyön käsittelemät ongelmat esitettiin alun perin käytettyjä huonekaluja myyvän ja kunnostavan yrittäjän toimesta. Yrityksen toiminnan seurauksena syntyy runsaasti pehmeää vaahdotettua polyuretaanijätettä, joka on peräisin kierrätetyistä huonekaluista, kuten sohvien pehmusteista. Yrittäjä kaipasi ratkaisuja polyuretaanijätteen kuljettamiseen ja käsittelyyn liittyviin ongelmiin. Ensinnäkään yrittäjällä ei ollut käytettävissään keinoja jätteen puristamiseksi pienempään tilaan, ja sellaisenaan vahtomuovijätteen kuljettaminen ei ole taloudellisesti järkevää. Tämän lisäksi yrittäjä halusi selvittää, onko polyuretaanijätteelle olemassa kierrätysmahdollisuuksia, sillä tällä hetkellä kaikki yrityksen polyuretaanijäte päätyy poltettavaksi energiana samalla kun valtaosa muusta jätteestä on kierrätettävissä.

Koska polyuretaanit ovat monipuolinen joukko materiaaleja eikä niiden kierrätysmahdollisuudet ole keskenään samanlaiset, keskitytään tässä työssä ennen kaikkea pehmeään vaahdotettuun polyuretaanijätteeseen, jota syntyy enimmäkseen kierrätetyistä huonekaluista ja patjoista. Myös muita polyuretaanityyppejä sivutaan, sillä erityisesti kemiallista kierrätystä koskevissa kysymyksissä suuntaa voi hakea myös kovasta polyuretaanivaahdosta, vaahdottomasta polyuretaanista ja muovien kierrätyksestä laajemmin.

Laboratoriokokeiden ja selvitystyön jälkeen pystyttiin nopeasti toteamaan, että teollinen jätapaalain on todennäköisesti taloudellisin vaihtoehto polyuretaanijätteen tilavuuden pienentämiselle ja on yleisimmin käytössä vastaavissa tilanteissa, joten jätteen kuljettamiseen ja tilavuuteen liittyvät tutkimuskysymykset jätettiin työn ulkopuolelle eikä aiheeseen syvennötty. Ne käytännön kokeet, jotka asiasta ehdittiin tekemään on kuitenkin selostettu myöhemmin.

Alla on listattu työtä ohjaavat tutkimuskysymykset ja avattu mitä ne pitävät sisällään.

1. Mitkä ovat ehdot polyuretaanin kierrätyksen kannattavuudelle?

Työn päämääränä on selvittää ne seikat, jotka vaikuttavat polyuretaanin kierrätyksen kannattavuuteen ja luoda käsitys siitä, missä tilanteissa polyuretaani kannattaa kierrättää ja missä ei. Kannattavuuteen vaikuttavina tekijöinä tarkastellaan esimerkiksi kierrätykseen vaadittavia investointeja, kierrätetyn polyuretaanin markkinoita sekä kierrättämisen etuja energiahyödyntämiseen nähden.

2. Mitkä ovat vaahdotetun polyuretaanin kierrätyksen tämänhetkiset mahdollisuudet Suomessa?

Vaahdotetun polyuretaanin tämänhetkiset kierrätysvaihtoehdot sekä kotimaiset polyuretaanin kierrätystä harjoittavat toimijat pyritään kartoittamaan. Tarkoituksena on näin luoda tilannekatsaus, jota käytetään pohjana alan kehityksen arviointiin. Nykyisten kierrätysmahdollisuuksien selvittäminen auttaa myös polyuretaanijätteen kanssa tekemisissä olevia yrityksiä.

3. Millaisia ovat tulevaisuuden mahdollisuudet vaahdotetun polyuretaanin kierrätykselle Suomessa?

Tavoitteena on kotimaisten ja ulkomaisten toimijoiden haastattelujen, julkaisujen, tutkimusten ja taloudellisten ja ympäristöllisten arvioiden avulla selvittää polyuretaanin kierrätyksen kasvumahdollisuudet ja tulevaisuudennäkymät Suomessa sekä mekaanisen että kemiallisen kierrätyksen osalta.

5 Aineisto ja menetelmät

Opinnäytetyön aineisto koottiin sekä julkisesti saatavissa olevasta tiedosta, kuten tutkimuksista, julkaisuista ja yritysten verkkosivuilta että yritysten haastatteluilla. Haastattelut tehtiin sähköpostitse marraskuun 2021 ja helmikuun 2022 välisenä aikana. Polyuretaanin tai sen kierrätyksen kanssa tekemisissä oleville yrityksille lähetettiin sähköpostilla listattuna kysymyksiä esimerkiksi toiminnasta ja volyymista ja tarvittaessa kysyttiin tarkentavia kysymyksiä ja näkemyksiä alan tulevaisuudesta. Työn kannalta kriittistä oli löytää alan toimijoita ja julkaistuja tutkimuksia polyuretaanin kierrätyksestä. Selvitystyö tehtiin internetin avulla ja kootuista tiedoista luodaan katsaus alan tilanteeseen.

Tietoa käytännön ongelmista, pullonkauloista ja muista haasteista sekä alan tulevaisuudennäkymistä, mahdollisuuksista ja vaihtoehdoista kerättiin polyuretaanin kierrätyksen kanssa tekemisissä olevilta yrityksiltä sekä kiertotalouteen kytkeytyviltä yrityksiltä. Katsaus alaan ja sen tulevaisuuteen muodostetaan yhdistämällä haastatteluista ja julkisista lähteistä saadut tiedot ja arvioimalla näiden avulla polyuretaanin kierrätyksen mahdollisuudet Suomen näkökulmasta.

Polyuretaanivaahdon tilavuuden pienentämiseksi tehdyt kokeet tehtiin Hamk Technic laboratoriossa Hämeenlinnassa. Kokeissa käytettiin sääkaappia (Espec ARS-0680), lämpökaappia, hydraulista puristinta sekä erilaisia hiontalaitteita ja asetonia.

6 Laboratoriokokeet

Työn alkuvaiheessa tehtiin erinäisiä kokeita, joilla pyrittiin selvittämään mahdollisuuksia pehmeän polyuretaanivaahdon tilavuuden pienentämiseksi ilman teollista paalainta. Paljon vahtomuovijätettä käsittelevillä yrityksillä, kuten huonekaluliikkeillä, on usein käytössä teollinen paalain, jolla patja- ja pehmustejäte puristetaan pienempään tilaan ja sidotaan kuljetuksen ajaksi kuution muotoisiksi paaleiksi (kuva 7). Päämääränä oli löytää tehokas keino käsitellä polyuretaania ennen sen kuljettamista niin, että se veisi mahdollisimman vähän tilaa ja näin laskisi kuljetuskustannuksia. Vaihtoehtoina olivat joko käsitellä

polyuretaania kemiallisesti niin, että sen rakenne saadaan muuttumaan tai saada polyuretaania muovattua tai murennettua lämpötilaa säätämällä tai paineen alla.

Kuva 7. Paalattua polyuretaanijätettä (Yunjie, n.d.).



6.1 Mekaaniset kokeet

Lämpötilan vaikutus polyuretaanin rakenteeseen oli pieni, mikä oli kertamuovin ollessa kyseessä odotettu tulos. Kylmennyskokeessa eri tiheyksisiä vaahtomuovipehmusteen paloja viilennettiin sääkaapissa -75 celsiusasteeseen. Sellaisenaan kylmennetyt vaahtomuovin palat

olivat kylmennyksen jälkeen jonkin verran kovettuneita, eivätkä ne palautuneet heti muotoon puristuksen jäljiltä. Kuitenkin huoneenlämpöön tullessaan vaahtomuovi lämpeni jo muutamissa sekunneissa ja palautui ominaisuuksiltaan entisenlaiseksi. Esimerkiksi hydraulisella puristimella oli käytännössä mahdotonta puristaa kylmää vaahtomuovinpala, sillä vaahtomuovi muuttui huoneenlämpöiseksi ennen kuin sitä edes ehdittiin puristaa. Huoneenlämpöiseen vaahtomuoviin ei kovallakaan paineella ollut vaikutusta.

Kokeessa yksi vaahtomuovipala kasteltiin vedellä ennen kylmentämistä, jotta vaahto saataisiin pysymään kovana pidempään. Kylmentämisen seurauksena vaahtomuovin sisältämä vesi jäättyi ja vaahtomuovia pystyi käsin murentamaan palasiksi. Vaikka vaahtomuovi tällä keinolla pysyi hieman kauemmin kylmänä, lämpeni sekin vain lyhyen ajan kuluttua huoneenlämpöön tuomisesta niin, ettei vaahto enää murentunut. Tilavuuden pienentämiseksi vaahtomuovi tulisi murskata halkaisijaltaan pienemmiksi kappaleiksi kuin sen sisältämät solut, joten vaahtomuovin jauhamiseksi olisi vielä täytynyt tehdä erillinen käsittely. Kastelussa vaahtomuovissa veden osuus massasta on merkittävä, ja vaikka materiaali saataisiinkin jauhettua, sisältäisi se silti niin paljon vettä, että se täytyisi kuivattaa ennen pakkaamista ja kuljettamista.

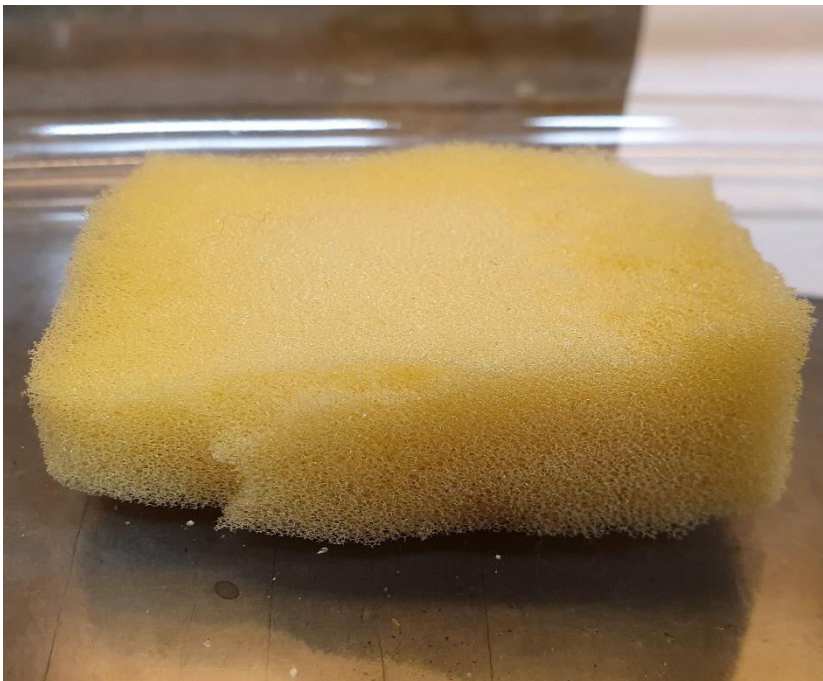
6.2 Kemialliset kokeet

Kemiallisissa kokeissa tutkittiin polyuretaanivaahdon reagoimista asetonin kanssa. Polyuretaanin kemiallinen kestävyys asetonia vastaan on huono, jonka vuoksi asetonin hyödyntämistä polyuretaanivaahdon tilauuden pienentämisessä kokeiltiin. Vaahtomuovipatjan paloja upotettiin kokonaan tai osittain asetoniin joko painojen alle tai sellaisenaan suljettuun tilaan ja jätettiin noin kahdeksi viikoksi vetokaappiin. Pelkissä asetonin kanssa kosketuksissa olevissa vaahtomuovin kappaleissa tapahtui kahden viikon aikana vain pieniä ulkonäöllisiä muutoksia, mutta materiaalin rakenteelliset ominaisuudet eivät huomattavasti muuttuneet. Koe kuitenkin osoitti, että asetonilla on tiettyjä vaikutuksia polyuretaaniin jo lyhyessä ajassa.

Selvin tulos saatiin asetoniin painojen alle jätetystä vaahtomuovinpalasta. Noin kahden senttimetrin paksuinen kappale (kuva 8) oli kahden viikon jälkeen noin puolentoista

millimetrin paksuinen, eikä enää palautunut takaisin muotoonsa (kuva 9). Asetoni siis muutti polyuretaanin rakennetta merkitsevästi niin, että paineen alla sen kertamuoville tyypilliset ominaisuudet antoivat periksi. Koska koetta ei tehty ilmatiiviissä tilassa ja asetoni täten pääsi haihtumaan jo varhaisessa vaiheessa, olisi sama tulos luultavasti saatu myös lyhyemmässä ajassa. Vaikka tulos oli tilavuuden pienentämisen kannalta merkittävä, ei tämä käsittelytapa ole erityisen käytännöllinen suurien polyuretaanimäärien tilavuuden pienentämiseen siihen tarvittavan suuren asetonimäärän ja puristusvoiman vuoksi.

Kuva 8. Vaahtomuovin kappale ennen koetta 8.11.2021.



Kuva 9. Vaahtomuovin kappale kokeen jäljiltä 26.11.2021.



6.3 Vakuumpakkaaminen

Jos teollista paalainta ei ole saatavilla, on vakuumpakkaaminen yksi vaihtoehto ilmavien materiaalien tilavuuden pienentämiseksi. Tämä onnistuu pieniä määriä käsitellessä vakuumisäkeillä, jotka ovat ilmatiiviitä ja sisältävät venttiilin, josta ilma voidaan imurin avulla imeä pois. Tämän seurauksena esimerkiksi pehmeä polyuretaanivaaho painautuu kasaan ja sen tilavuus pienenee merkittävästi. Suuria määriä materiaalia käsitellessä myös vakuumpakkauksia pitää olla paljon, joka voi tulla kalliiksi tai niiden tulee olla suuria, joka lisää tarvittavaa imuvoimaa. Vakuumpakkaamiseen tarkoitetut säkit voidaan käyttää uudelleen, mutta niiden ilmatiiviys saattaa kärsiä ajan kuluessa.

7 Selvityksen tulokset

Tehdyn selvityksen ja tilannekatsauksen tulokset jaetaan kahteen osaan Suomen ja muun maailman tilanteeseen. Tällä hetkellä polyuretaanin kierrätys on maailmalla tasaisen harvinaista, ja Suomi on alalla vasta ottamassa kehityksensä alkuaskelia.

7.1 Polyuretaanin kierrätyksen tilanne maailmalla

Maailmalla erilaisia polyuretaanityyppejä kierrätetään monin tavoin, vaikka kaatopaikkasijoitus ja energiakäyttö ovat edelleen vallalla olevat käsittelytavat. Mekaaninen kierrätys on huomattavasti kemiallista tavallisempaa, vaikka muovien kemiallisen kierrätyksen kehittyessä myös polyuretaaneihin on alettu kiinnittämään tällä saralla enemmän huomiota. European bedding industries' associationin julkaiseman tutkimuksen mukaan EU:n alueella pehmeästä polyuretaanivaahdosta kaatopaikoille päätyy edelleen jopa 49 %, kun energiakäyttöön päätyi 33 % ja kierrätettäväksi 17 %. Kaatopaikkasijoituksen osuus tulee lähitulevaisuudessa todennäköisesti pieneneään nopeasti EU:n ajaman lainsäädännön myötä. (EUROPUR, 2021)

Mekaanisella kierrätyksellä on pitkät perinteet etenkin Yhdysvalloissa, jossa kierrätetyistä patjoista, sohvista ja muista pehmusteista kerättyä polyuretaania käytetään murskattuna kokolattiamattojen alle laitettavien pehmustemattojen pääraaka-aineena. Mattojen pehmusteiden valmistaminen on yksinkertainen prosessi, jossa silputut vaahtopalat puristetaan yhteen sidosaineen, paineen ja höyryn avulla ja leikataan maton muotoon. Lähes kaikki Yhdysvalloissa tuotetut alusmatot on valmistettu joko pehmustetuotannon sivuvirroista tai kierrätetyistä pehmusteista (kuva 10).

Kuva 10: Polyuretaanijätteestä valmistettua kokolattiamaton alusmattoa (Interfloor, n.d.).



Samalla menetelmällä valmistetaan monissa muissakin maissa yhteensidotuista vaahtomuovinkappaleista muodostuvaa materiaalia, joka kulkee usein nimellä PU bonded foam. Tällä on materiaalina olemassa jonkinlaiset markkinat, ja siitä tehdään muun muassa tärinänvaimentimia ja äänieristeitä. Sidotulla polyuretaanivaahdolla on keskimäärin huomattavasti suurempi tiheys kuin neitseellisellä polyuretaanivaahdolla, joka tekee siitä painavempaa ja rajaa sen käyttömahdollisuuksia ja markkinoita. (Dafa Industry, n.d.; EUROPUR, 2016; Foamland, n.d.)

Polyuretaanin kemiallisen kierrätyksen laitoksia toimii Euroopassa muutamia, ja ne keskittyvät lähinnä neitseellisen polyuretaanin leikkuujätteiden kemialliseen kierrätykseen. Toistaiseksi vain yksi laitos Ranskassa kierrättää kemiallisesti kuluttajilta kerättyä polyuretaania, jonka lisäksi kaksi muuta laitosta on rakenteilla Alankomaihin ja Espanjaan, joiden on määrä aloittaa toimintansa vuoden 2022 aikana. Tällä hetkellä Euroopan ulkopuolella ei tiettävästi ole toiminnassa kaupallisen tason laitoksia, mutta alan tutkimus- ja kehitystyö on maailmanlaajuista. (Dow, n.d.; Repsol, n.d.; RetourMatras, n.d.)

7.2 Polyuretaanin kierrätyksen tilanne Suomessa

Koska Suomessa polyuretaanijätteelle ei ole vakiintuneita kierrätyspaikkoja, on sen ylivoimaisesti yleisin loppusijoituspaikka energiahyödyntäminen. Erilaista polyuretaanijätettä syntyy pisteittäin ympäri maata, ja yksittäisten virtojen volyymit ovat usein verraten pieniä. Suuriakin jätemääriä käsittelevät yritykset, kuten huonekaluja vastaanottavat jäteasemat tai muovipakkausten kierrätyksestä vastaavat yritykset eivät tiettävästi ole keskittyneet löytämään kierrätysratkaisuja polyuretaanille. Pakkausmuovien osalta tämä on luonnollista, sillä polyuretaanin osuus pakkausjätteestä on hyvin pieni. Pehmeää polyuretaanivaahtoa ei tiettävästi kierrätetä Suomessa edes mekaanisesti, mikä saattaa osittain johtua siitä, ettei Suomessa ole merkittävää pehmeän polyuretaanivaahdon tuotantoa.

Selvityksen yhteydessä löytyi kaksi suomalaista yritystä, jotka harjoittavat jonkinasteista polyuretaanin kierrätystä osana liiketoimintaa. Nämä ovat erilaisia vaahtomuovieristeitä valmistama Finnfoam Oy ja kylmälaitteiden kierrätykseen erikoistunut Cool-Finland Oy. Molempien yrityksen kohdalla kyse on kovista polyuretaanieristeistä ja kummassakin tapauksessa jätettä on kuljetettu myös Suomen ulkopuolelle kierrätettäväksi.

Finnfoam Oy kerää rakennusten purkujätteenä syntyviä kovia polyuretaanieristeitä ja muita vaahtomuoveja hyödyntäen näitä omalla tuotantolinjallaan rouhittuna FF-SILENT -massaan. FF-SILENT -massaa käytetään äänieristyksessä ja palosuojauksessa. Haastattelussa yrityksen edustaja kertoi, ettei vaahtomuovijätteen kuljettamisens olisi taloudellisesti kannattavaa, ellei sitä tehtäisi uuden materiaalin toimittamisen yhteydessä paluukuormana. Sen sijaan jätteen likaisuus ei tässä prosessissa haittaa. Finnfoamilla syntyy myös puhdasta polyuretaanijätettä tuotannon sivuvirtana. Tämä jäte kuljetetaan kierrätettäväksi yhteistyökumppanille Liettuaan, jossa siitä valmistetaan puuta korvaavia, kosteutta kestäviä rakennuselementtejä. Finnfoamin kierrätysprosessi on suunniteltu suljetusti tietyille materiaalityypeille, eikä esimerkiksi pehmeä polyuretaanivaahdo sovellu kierrätettäväksi samoihin tuotteisiin.

Cool-Finland Oy purkaa vanhoja kylmälaitteita ja erottelee niiden materiaalit kierrätettäväksi. Prosessissa syntyy polyuretaanijätettä, joka jauhetaan hienoksi pölyksi. Polyuretaanipölyä on

kuljetettu Saksaan sisaryhtiön laitokselle, joka hyödyntää sitä materiaalina erilaisten tuotteiden valmistamisessa. Tätä ei yrityksen edustajan mukaan kuitenkaan viime aikoina ole tehty korkeista kuljetuskustannuksista ja pienestä volyymista johtuen, vaan polyuretaanijäte on mennyt suoraan energiakäyttöön. Yrityksellä on silti tahtotilaa löytää jätteelle kierrätyskohteita ja polyuretaanijätettä onkin lähetetty eristeteollisuuden testattavaksi ulkomaille. Kuljetuskustannuksien lisäksi yritys mainitsee kovan polyuretaanivaahdon kierrättämisen haasteeksi materiaalin paloarkuuden ja korkean palamislämpötilan, joka aiheuttaa riskin pölyräjähdykselle. Tämän ehkäisemiseksi happipitoisuutta lasketaan syöttämällä prosessiin ilmasta erotettua typpeä. Jauhamisvaiheessa vapautuvat kupltiusaineet, niin CFC:t kuin uudemmatkin haitta-aineet on myös lain mukaan kerättävä talteen ja hävitettävä.

Suomalainen Neste Oyj on ilmoittanut julkisesti aloittavansa pilotoimaan teknisten muovien kemiallista kierrätystä Suomessa ja tekevänsä yhteistyötä mm. saksalaisen Covestron AG:n kanssa. Covestro on kehittänyt kemiallisen menetelmän pehmeän polyuretaanivaahdon kaikkien ainesosien talteenottamiseen kierrätystä varten. Julkisuuteen ei ole annettu kuitenkaan tietoa, kehittävätkö yritykset nimenomaan polyuretaanin kierrätystä. (Neste, 2020; Neste, 2022)

8 Johtopäätökset

Haastatteluiden ja muun selvityksen pohjalta voidaan todeta, että pehmeän vaahdotetun polyuretaanin kierrätystä ei Suomessa vielä tehdä. Maailmalla kierrätys on paikoin yleistä ja etenkin Euroopassa kasvavan kiinnostuksen kohteena. Kierrätyksen toimivuutta ja kannattavuutta säätelevät erilaiset taloudelliset, laadulliset ja logistiset ehdot. Näiden ehtojen täyttyminen ei ole Suomen kokoluokassa itsestäänselvyys, mutta jonkinasteiselle kokeilulle on ennen pitkää tarvetta, viimeistään kierrätystavoitteiden koventuessa.

8.1 Tämän päivän haasteet

Suurimmat haasteet liittyvät jätevirtojen laatuun ja määrään. Tilannetta on helpompi ymmärtää, jos ei ajattele polyuretaaneja yhtenä materiaalina, vaan useiden kymmenien

materiaalien joukkona, jossa materiaalit eivät aina ole keskenään yhteensopivia kierrätystavoiltaan. Kierrätetyn materiaalin laadun säilyttämisen kannalta parhaaseen lopputulokseen päästään vain niillä materiaalivirroilla, jotka ovat keskenään yhteensopivimpia ja joita syntyy eniten. Mitä epätasalaatuisempaa kierrätyksen lopputuote on, sitä rajatumpia ovat sen käyttömahdollisuudet.

Epätasalaatuisuuteen liittyvät haasteet koskettavat erityisesti kemiallista kierrätystä. Kemiallinen kierrätys on myös metodina joustamaton ja vaatii isoja investointeja vain tätä yhtä tarkoitusta varten rakennettuihin laitoksiin. Siksi kemiallinen kierrätys on käytössä lähinnä niissä maissa, joissa kierrätysmateriaali saadaan polyuretaanin tuotannon sivuvirroista. Suomessa pehmeän polyuretaanin tuotantoa on hyvin vähän, jolloin korkeintaankin vain muutaman pienen tehtaan sivuvirrat eivät olisi riittäviä kierrätetyn polyolin tuotannolle, ellei tuotantolaitokset itse hyödyntäisi omia sivuvirtojaan.

Toinen merkittävä polyuretaanin kierrätystä rajoittava tekijä on pienet markkinat mekaanisesti kierrätetylle materiaalille. Vaikka polyuretaanin kierrätysprosentti on toistaiseksi pieni, on maailmalla kierrätettyjen polyuretaanituotteiden kysynnän arvioitu olevan maailmanlaajuisesti hieman tuotantoa pienempi (EUROPUR, 2021). Tämä haaste koskee monia muitakin hankalia materiaaleja, sillä kierrätetystä materiaalista valmistetut tuotteet voivat olla paitsi heikkolaatuisempia myös kalliimpia valmistaa.

Taloudellisen kannattavuuden lisäksi tarvitaan lisää tietoa polyuretaanin kierrätyksen ympäristökuormituksesta. Itsestäänselvää ei ole, että vaikeiden materiaalien kierrättäminen olisi ympäristövaikutuksiltaan pienempi vaihtoehto kuin niiden energiakäyttö. Mikäli näin ei ole, on kiertotalouden merkitystä tapauskohtaisesti punnittava.

8.2 Mahdollisuudet

Mikäli polyuretaanijätteen virtoja saadaan ohjattua ja keskitettyä, on Suomessakin edellytyksiä huonekalujen pehmusteiden mekaaniselle kierrätykselle ja hyötykäytölle. Kierrätyksessä voisi todennäköisesti käyttää ainoastaan kierrätyksestä syntyvää materiaalia, sillä tuotantojen sivuvirtoina ei pehmeää polyuretaania Suomessa synny kovin paljoa. Edellä

mainitusta syystä kierrätettävä materiaali olisi ennalta-arvaamattomampaa ja näin ollen epätasaisempaa kuin jos materiaalin lähteenä olisi tasalaatuinen sivuvirta, jonka tuottama materiaali olisi aina ennakoitavissa. Siksi mekaaninen kierrätys olisi Suomessa kemiallista kierrätystä realistisempi menetelmä.

Mekaaninen kierrätys olisi syytä keskittää sellaisten uusiotuotteiden valmistukseen, jotka hyödyntävät käsiteltävän polyuretaanin niitä ominaisuuksia, jotka ovat kutakuinkin samat mahdollisimman suurella osalla kierrätettäväksi tulevasta polyuretaanista. Esimerkiksi pehmeiden polyuretaanivaahdojen ääntä eristävät ja pehmustavat ominaisuudet ovat hyvin samankaltaisia lähteestä riippumatta. Tämän vuoksi pehmeät ja akustiikkaa parantavat kokolattiamattojen alusmatot ovat hyväksi todettu uusiotuote.

Vaikka maailmanlaajuinen kysyntä kierrätetyille polyuretaanituotteille on pieni eikä tuotannon nopeaan kasvuun ole välttämättä edellytyksiä laajassa kuvassa, ei Suomessa toistaiseksi ole kuluttajille tarjolla kotimaisia kierrätyspolyuretaanituotteita ja kysyntää voisi siten löytyä jo muualla kehitetyillekin tuotteille. Ulkomailta tuotuja kierrätyspolyuretaanituotteita on tarjolla vähän jos ollenkaan. Mahdollisia tuotekehityksen kohteita voisi olla esimerkiksi kierrätetystä polyuretaanista valmistetut vinyyli- tai parkettilattioiden alustusmateriaalit, monenlaiset patjat ja pehmusteet lemmikintarvikkeista kalusteisiin sekä ääntä vaimentavat akustiikkalevyt, joista jälkimmäiset on jo tutkimuksissa todettu kilpailukykyisiksi vaihtoehtoisiksi (Del Rey ym., 2012).

Käytännössä suurin mekaanisen kierrätyksen potentiaali sisältyy todennäköisesti sidotun polyuretaanivaahdon valmistukseen. Suomessa sidotulle polyuretaanivaahdolle voisi olla markkinoilla käyttökohteita esimerkiksi parvekemattojen ja kynnysmattojen pehmikkeinä, sekä kuntosaleilla ja muussa sisäliikunnassa käytettyinä pehmustemattoina. Sidotun polyuretaanivaahdon tuotantoedellytyksiä tulisi vielä selvittää. Jätevirtojen ohjailu saattaisi onnistua ainakin pienessä mittakaavassa, mutta useista lähteistä pienien polyuretaanierien ohjaaminen sidotun polyuretaanivaahdon laajempaan tuotantoon saattaa muodostua solmukohdaksi. Sama ongelma koskee kaikkea muutakin polyuretaanin kierrätystä. Sidotun polyuretaanivaahdon valmistaminen on kuitenkin verraten helppoa, se on osoitettu toimivaksi ratkaisuksi maailmalla ja sen käyttökohteet ovat laajemmat kuin muilla olemassa

olevilla kierrätystuotteilla. Näiden seikkojen valossa sidotun polyuretaanivaahdon tuotannon pilotointiin voisi olla Suomessa aihetta, varsinkin kierrätystavotteiden vähitellen kiristytessä kiertotalousmallin painottuessa päätöksenteossa.

8.3 Tulevaisuus

Yksisuuntainen talousmalli on vähitellen taipumassa kiertotalousmalliin ympäristön säästämisen ja ilmastonmuutoksen pakottaessa muuttamaan suhdetta luonnonvarojen käyttöön ja kertakäyttökulttuuriin. Tapahtuva muutos luo paineita löytää ratkaisuja haastavienkin materiaalien kierrätykseen, kun energiahyödyntämistä tai kaatopaikkasijoitusta ei enää voida ajatella ensisijaisena ratkaisuna jätteenkäsittelyyn. Polyuretaanien suuri kirjo on osaltaan kohtaamassa tätä muutosta ennemmin tai myöhemmin. Polyuretaanien kierrätys onkin hiljalleen nousemassa puheenaiheeksi, kun huonekaluliikkeet ja rakennusteollisuus alkavat etsimään keinoja materiaalien elinkaarien pidentämiselle ja toimintansa ympäristövaikutusten pienentämiselle. Jo työn tekemisen aikana aihe on noussut enemmän esiin ja merkittäviä uusia raportteja ja tutkimuksia aiheesta on julkaistu. Uusien kierrätyslaitosten rakentamisesta ja yritysten yhteistyöstä kierrätystapojen löytämiseksi on uutisoitu. Tälle kehityssuunnalle ei lähiaikoina ole odotettavissa loppua. Päinvastoin, tällä hetkellä nähtävissä on vasta ensiaskeleet kohti tulevaisuuden kiertotaloutta.

Kemiallisten kierrätysmenetelmien kehittyminen yhdistettynä jätteiden lajittelun kehittymiseen nostaa tulevaisuudessa kaikkien polymeerien kierrätyksen uudelle tasolle. Polyuretaanien kierrätyksen tulevaisuus piilee mitä luultavimmin kemiallisessa kierrätyksessä. Siihen päästäkseen keräys- ja lajittelumenetelmien täytyy ottaa kehityksessään suuria harppauksia. Mekaaniselle kierrätykselle on luultavasti tulevaisuudessakin tilaa, ja etenkin lähitulevaisuudessa mekaanisen kierrätyksen ratkaisut ovat suuressa roolissa jätteenkäsittelyssä. Myös polyuretaanin energiahyödyntäminen on vielä tulevaisuudessakin varmasti vartenotettava vaihtoehto erityisen haastavissa tapauksissa. Jätteiden energiahyödyntäminen on uusiutuvan energiantuotannon rinnalla kestävä ratkaisu, jota ei täysin kannata syrjäyttää. Tämän työn kattama näkökenttä osuu kehityksen siihen vaiheeseen, jossa ratkaisut ovat vasta muotoutumassa. Jo muutaman

vuoden päästä ala on luultavasti saavuttanut merkittäviä edistysaskelia ja polyuretaanin kierrätykseen on alettu kiinnittämään enemmän huomiota myös Suomessa. Juuri nyt maassamme on vielä runsaasti tilaa uusille innovaatioille polyuretaanien ja muiden vaikeiden materiaalien saattamiseksi osaksi kiertotaloutta.

Lähteet

Abnisa, F., Aroua, M., Daud, W. & Sharuddin, S. (2017). Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste. *Energy Conversion and Management* 148, s. 925–934.

Ahola, A., Alarotu, M., Antikainen, M., Honkatukia, J., Järnefelt, V., Kapanen, J., Lantto, R., Laurikkala, M., Naumanen, M., Orko, I., Ritschkoff, A., Still, K., SundqvistAndberg, H., Tenhunen, A., Wiman, H., Winberg, I. & Åkerman, M. (2020). Kiertotalouden ekosysteemit. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja.

https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162083/TEM_2020_13.pdf

Anace. (n.d.). *Production of PUR recycling polyol*. <https://www.anace.eu/en/polyurethane-recycling>

Bang & Bonsomer Group Oy. (2021). *Ekospray, tuotetieto*.

https://www.rttuotetieto.fi/pub/media/resources/156479_RT-103384.pdf

Behrendt, G. & Naber, B. W. (2009). The Chemical Recycling Of Polyurethanes. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 44(1), 3–23.

https://dl.uctm.edu/journal/node/j2009-1/1_Review_3-23.pdf

Carpet Cushion Council. (n.d.). *Recycling*. <http://www.carpetcushion.org/recycling.cfm>

Casey, T. (7.5.2020). Beyond Ocean Plastic: Recycling Tackles the Polyurethane Foam Problem. *Triple Pundit*. <https://www.triplepundit.com/story/2020/beyond-ocean-plastic-recycling-tackles-polyurethane-foam-problem/88981>

Covestro. (2021). *Closing the loop for polyurethane mattresses*.

<https://www.covestro.com/press/closing-the-loop-for-polyurethane-mattresses-public/>

Dafa Industry. (n.d.). *Bonded foam*. Tuote-esittely. <https://dafa-industry.com/en/what-we-do/materials/polyurethane-foam/bonded-foam>

Del Rey, R., Fernandez, J. & Arenas, J. (2012). *An empirical modelling of porous sound absorbing materials made of recycled foam.*

https://www.researchgate.net/publication/256658335_An_empirical_modelling_of_porous_sound_absorbing_materials_made_of_recycled_foam

Dong, Q., Li, J., Liu, L., Liu, S., Xie, H. & Yang, W. (2012). Recycling and disposal methods for polyurethane foam wastes. *Procedia Environmental Sciences* 16, s. 167 – 175.

<https://core.ac.uk/download/pdf/81928123.pdf>

Dow. (n.d.). *The RENUVA™ Program.* <https://corporate.dow.com/en-us/science-and-sustainability/2025-goals/renuva-program.html>

Eskelinen, H., Haavisto, T., Salmenperä, H. & Dahlbo, H. (2016). *Muovien kierrätyksen tilanne ja haasteet.* CLIC Innovationin raportti.

Euroopan parlamentti. (2018). *Kiertotalouspaketti: EU:n uudet tavoitteet kierrätykselle.*

<https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20170120STO59356/kiertotalouspaketti-eu-n-uudet-tavoitteet-kierrätykselle>

Euroopan parlamentti. (2020). Mitä kiertotalous on ja miksi sillä on merkitystä?

<https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/economy/20151201STO05603/mita-kiertotalous-on-ja-miksi-silla-on-merkitysta>

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2008/98/EC. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02008L0098-20180705>

EUROPUR. (2016). *Flexible polyurethane foam in mattresses and furniture: An overview of possible end-of-life solutions.* <https://www.isopa.org/media/2763/flexible-foam-end-of-life-solutions.pdf>

EUROPUR. (2021). *The end-of-life of flexible polyurethane foam from mattresses and furniture.* EUROPUR:in raportti.

Evonik. (2021). *Evonik partners with The Vita Group for pioneering efficient polyurethane mattress recycling process*. Lehdistötiedote. <https://www.pu-additives.com/en/evonik-partners-with-the-vita-group-for-pioneering-efficient-polyurethane-mattress-recycling-process-165382.html>

Foamland. (n.d.). *Bonded polyurethane foams*. Tuote-esittely. <https://www.foamland.es/bonded-polyurethane-foams>

Fortum. (n.d.). *Riihimäen laitosalue*. <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisoille/kierratys-ja-jatepalvelut/recycling-waste-yhteystiedot-ja-toimipaikat/riihimaen-laitosalue>

Fulev, S., Skokova, L. (2013). *Sustainable conversion of flexible PU foam scrap into polyol on an industrial scale by H&S Anlagentechnik GmbH*. European Polyurethane Journal. <https://www.fapu.de/index.php/en/presentations/epuj-03-04-2013/sustainable-conversion-of-flexible-pu-foam-scrap-into-polyol-on-an-industrial-scale-by-h-s-anlagentechnik-gmbh>

Gama, N., Godinho, B., Marques, G., Silva, R., Barros-Timmons, A. & Ferreira A. (2020). Recycling of polyurethane scraps via acidolysis. *Chemical Engineering Journal*, 395. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894720310949>

Gradadolnik, M., Drinčić, A., Oreški, A., Onder, O. C., Utroša, P., Pahovnik, D. & Žagar, E. (2022). Insight into Chemical Recycling of Flexible Polyurethane Foams by Acidolysis. *ACS Sustainable Chem. Eng*, 10(3), 1323–1332.

Harmaala, M. (2021). Transition from linear to circular business models with service design methodology to drive innovation and growth. *HHBIC 2020*, 17–18.11.2020. <https://esignals.fi/research/en/2021/02/22/transition-from-linear-to-circular-business-models-with-service-design-methodology-to-drive-innovation-and-growth/#e3946ea5>

Hsy. (n.d.). Hsy:n jäteopas. <https://www.hsy.fi/jatteet-ja-kierratys/jateopas/jatteet/styroksi-polystyreeni/>

IAL Consultants. (2018). *The 12th Edition of Report on the Markets for Polyurethane Chemicals and Products in Europe, Middle East and Africa*.

Interfloor. (n.d.). Polyuretaanijätteestä valmistettua kokolattiamaton alusmattoja [kuva].
<https://www.interfloor.com/underlay-manufacturing/>

Isopa. (2012). *Recycling and Recovery of Polyurethanes*.
<https://www.isopa.org/media/2617/reuse-and-reprocessing.pdf>

Järvelä P. & Järvelä P. (2015). *Teknisten muovien kierrätys ja uusiokäyttö*. s. 21–47.

Kaartinen, T., Laine-Ylijoki, J., Koivuhuhta, A., Korhonen, T., Luukkanen, S., Mörsky, P., Neitola, R., Punkkinen, H. & Wahlström, M. (2010). *Pohjakuonan jalostus uusiomateriaaliksi*. VTT:n tiedote.
<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2010/T2567.pdf>

Kemona, A & Piotrowska, M. (2020). Polyurethane Recycling and Disposal: Methods and Prospects. *Polymers*, 12(8), 1752. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7464512/>

Kiss, G., Rusu, G., Bandur, G., Hulka, I., Romecki, D. & Péter, F. (2021). Advances in Low-Density Flexible Polyurethane Foams by Optimized Incorporation of High Amount of Recycled Polyol. *Polymers*, 13(11), 1736.

Kraitape, N. & Thongpin, C. (2016). Influence of Recycled Polyurethane Polyol on the Properties of Flexible Polyurethane Foams. *Energy Procedia* 89, s. 186–197.

Lardiés, N. (31.7.2020). Chemical recycling of polyurethane waste. *Recycling Magazine*.
<https://www.recycling-magazine.com/2020/07/31/chemical-recycling-of-polyurethane-waste/>

Leomuovi. (n.d.). *Raaka-aineet*. <https://leomuovi.fi/tekniikat-ja-materiaalit/raaka-aineet/>

Mobius Technologies. (n.d.). *MPU Polyurethane Powder: From the Circular Economy - for the Circular Economy*. <https://www.lhj.fi/client/lhj/userfiles/image-mobius-en-v160422-003.pdf>

Muoviteollisuus ry. (n.d.). *Kierrätyssanasto*.

<https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/sanasto/?ltr=11&tag=72>

Neste. (2020). *Neste and Covestro join forces – renewable raw materials for plastics production*. Lehdistötiedote. <https://www.neste.com/releases-and-news/plastics/neste-and-covestro-join-forces-renewable-raw-materials-plastics-production>

Neste. (2022). *Neste successfully concludes first series of processing trial runs at industrial scale with liquefied waste plastic in Porvoo, Finland*. Lehdistötiedote. <https://www.neste.com/releases-and-news/circular-economy/neste-successfully-concludes-first-series-processing-trial-runs-industrial-scale-liquefied-waste>

Plastics Europe. (n.d.). *Recycling technologies*.

<https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/recycling/recycling-technologies/>

Repsol. (n.d.). *Chemical recycling of polyurethane foam*.

<https://www.repsol.com/en/sustainability/circular-economy/our-projects/chemical-recycling-of-polyurethane-foam/index.cshtml>

RetourMatras. (n.d.). Yrityksen verkkosivut. <https://www.retourmatras.nl/>

RINKI. (n.d.) *Muovipakkaukset*. <https://rinkiin.fi/usein-kysyttya/muovipakkaukset/#6d694e30>

Roschier, S., Mikkola, J., Värre, U. & Saario, M. (2020). *Muovijätteen kemialliset hyödyntämisratkaisut ja -markkinat kiertotaloudessa*. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu. s. 34. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161993/TEM_2019_64.pdf

Salovaara, J. (2017). *Jätteenpolttotekniikat Suomessa* [kandidaatintyö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto].

https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/146316/Kandidaatinty%c3%b6_Salovaara_Jouni.pdf?sequence=1

Simón, D., Borreguero, A. M., de Lucas, A. & Rodríguez, J. F. (2015). Glycolysis of viscoelastic flexible polyurethane foam wastes. *Polymer Degradation and Stability*, 116, 23–35.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391015000907>

Sitra. (n.d.). *Kiertotalous*. <https://www.sitra.fi/tulevaisuussanasto/kiertotalous/>

Sitra. (2020). *Megatrendit*. <https://www.sitra.fi/aiheet/megatrendit/>

Sitra. (2021). *Kiertotalouden kiinnostavimmat 2.1*. Haettu 25.4.2022 osoitteesta

<https://www.sitra.fi/hankkeet/kiertotalouden-kiinnostavimmat/>

Suomen palautuspakkaus. (n.d.). Yrityksen verkkosivusto. Haettu 23.4.2022 osoitteesta

<http://pantilliset.fi/perustietoa/>

Suomen Uusiomuovi Oy. (2019). *Ennakkotietoa vuoden 2018 muovipakkausten kierrätyksestä: Kotitalouksien muovipakkausten kierrätys kasvoi 59 %*. Tiedote.

https://www.uusiomuovi.fi/fin/suomen_uusiomuovi/ajankohtaista/2019/03/ennakkotietoa-vuoden-2018-muovipakkausten-kierratyksesta-kotitalouksien-muovipakkausten-kierratys-kasvoi-59/

Suomen Uusiomuovi Oy. (n.d.a). *Energiahyötykäyttö*.

https://www.uusiomuovi.fi/fin/pakkaus_kiirtaa/muovien_kierratys/energiahyotykaytto

Suomen Uusiomuovi Oy. (n.d.b). *Usein kysyttyä kierrätyksestä*.

https://www.uusiomuovi.fi/fin/kuluttajalle/usein_kysyttya_kierratyksesta/

Suomen Uusiomuovi. (n.d.) *Tietoa meistä*.

https://www.uusiomuovi.fi/fin/suomen_uusiomuovi/

Syke. (2018). *Kestävä suunnittelu vähentää tuotteiden ilmastovaikutuksia*. https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/e25090fe-19b6-40ae-a65b-78b901433a2a/kestava-suunnittelu-vahentaa-tuotteiden-ilmastovaikutuksia.html#ref_SEP09

Teräsrakenneyhdistys. (n.d.). *Teräksen kierrättäminen*. <https://www.terasrakenneyhdistys.fi/fin/teras/co2-ja-kiertotalous/teraksen-kierratys/>

Tilastokeskus. (9.12.2021). *Yhdyskuntajätteen määrä jatkoj kasvuaan vuonna 2020 – suurin osa jätteistä hyödynnettiin edelleen energiana*. https://www.stat.fi/til/jate/2020/13/jate_2020_13_2021-12-09_tie_001_fi.html

TPC. (2020). *The Many Types of Polyurethane and What They Are Used For*. Blogipostaus. <https://goturethane.com/the-many-types-of-polyurethane-and-what-they-are-used-for/>

University of Alicante. (n.d.). *Production of briquettes for energy recovery of furniture waste with polyurethane foams*. <https://innoua.ua.es/Web/FichaOferta?pldOferta=1282&language=en>

Valtioneuvoston kanslia. (n.d.). *Mitä on kestävä kehitys?* <https://kestavakehitys.fi/kestava-kehitys>

Ympäristöministeriö. (n.d.). *Mitä on kestävä kehitys?* <https://ym.fi/mita-on-kestava-kehitys>

Ympäristöministeriö. (2021). *Jätesäädöspaketti*. <https://ym.fi/jatesaadospaketti>

Yunjie. (n.d.). Tuotekuva paalatusta polyuretaanista [kuva]. <http://www.dgyunjie.com/foam-scrap-p31.html>

Zahedifar, P., Pazdur, L., Vande Velde, C. M. L., & Billen, P. (2021). Multistage Chemical Recycling of Polyurethanes and Dicarbamates: A Glycolysis–Hydrolysis Demonstration. *Sustainability*, 13(6), 3583.

Zevenhoven, R. (2004). *Treatment and disposal of polyurethane wastes: oprions for recovery and recycling*. <http://users.abo.fi/rzevenho/tkk-eny-19.pdf>

