

Laskennallinen tarkastelu rakennusten purkumuovien hyödyntämismahdollisuuksista - loppuraportti

Kirsikka Kiviranta, Juha Hakala

23/06/2021 VTT – beyond the obvious

VTT-R-00593-21

Projektin tausta ja tavoite

- Projektin on tehty Smart & Clean -säätiön rahoituksella ja yhteistyössä Kaikki muovi kiertää -ekosysteemin kanssa
- Projektin tavoitteena on kehittää laskennallinen malli, jolla rakennusten purkumuovien hyödyntämisen kannattavuutta voidaan alustavasti arvioida eri kohteissa
 - Kohteena purkutyömaa
- Tarkasteltaville purkumuovien hyödyntämisvaihtoehdoille lasketaan kustannukset purkutoimijan näkökulmasta sekä hyödyntämisvaihtoehtojen CO₂-päästöt
- Työssä kehitettävä ja sovellettava lähestymistapa rakennusten purkumuovien hyödyntämisen kannattavuuden arviointiin:
 - Tarjoaa perustan laajennetuille, yksityiskohtaisemmille ja tarkemmille analyyseille
 - Auttaa luomaan valmiuksia päätöksenteon tueksi
- Työssä kehitettävää ja sovellettavaa lähestymistapaa voidaan myös laajentaa rakennusten purkumuovimateriaalien lisäksi muiden (muovi)materiaalivirtojen hyödyntämisen mahdollisuuksien ja kannattavuuteen liittyviin tarkasteluihin



Laskennallisen mallin hyödyntäminen

- Laskennallisen mallin avulla **purkutoimija** voi alustavasti arvioida kustannus- ja päästörakenteen muutosta, mikäli purkutoimija haluaa tähdätä purkukohteen muovien kierrätysasteen nostoon
- Mallin avulla käyttäjä (purkutoimija) voi arvioida **saavutettavissa olevaa säästöpotentiaalia**, joka muovin kierrätyksellä olisi saavutettavissa verrattuna nykytilaan (energiakäyttö)
 - Tämä säästöpotentiaali olisi käytettävissä erilliskeräyksen aiheuttamiin lisäkustannuksiin (esim. manuaalinen työ)
- Mallin avulla käyttäjä voi myös alustavasti arvioida purkukohteen muovijakeiden eri kierrätysvaihtoehtojen (mekaaninen kierrätys, pyrolyysi) **CO₂-päästöjä** suhteessa nykytilaan



Mallinnettava esimerkkikohde

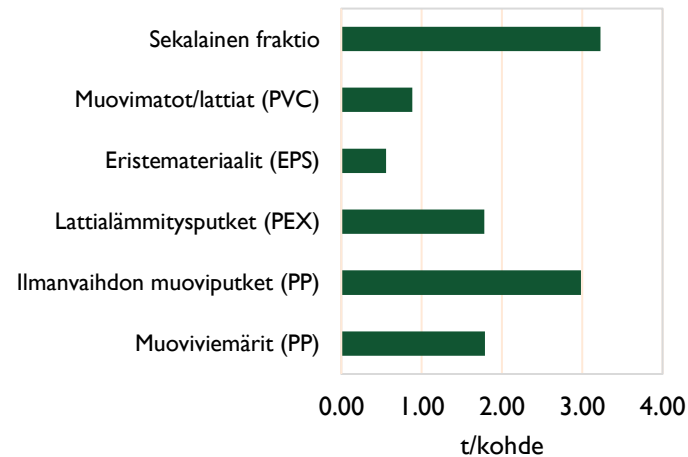
- Muovien käyttö vaihtelee paljon rakennuskohteittain
 - Riippuu mm. suunnittelijan valinnoista, rakennustyyppistä ja rakennuksen iästä
- Ulkopuolisen asiantuntijaryhmän kanssa pyrittiin kartoittamaan purkukohteiden muovidataa
 - Haaste: Tietopohja purkukohteiden sisältämistä muovijakeista on rajallista
- Mallinnettavaksi esimerkkikohteeksi valittiin puukerrostaloja sisältävä kohde (7074 br-m²), jonka sisältävät muovijakeet ovat tiedossa aiemmin tehdyn Plastics in Buildings –selvityksen pohjalta
 - Tiedossa muun muassa muovilaadut, niiden sijainnit ja volyymit kohteessa
- Mallinnettavan esimerkkikohteen rakennusvuosi on 2015
 - Kohde valittiin, koska kohteesta oli saatavilla kattavasti dataa sen sisältämistä muovijakeista vaikka se ei välttämättä edusta nyt purettavana olevaa rakennuskantaa
- Muovijakeiden laadun, sijainnin ja volyymien perusteella VTT:n asiantuntijoiden avulla tehtiin arvio eri muovijakeiden hyödynnettävyydestä
 - Lisäksi hyödynnettiin alan toimijan näkemystä kierrätettävissä olevista muovijakeista ja vaadittavista esikäsittelyistä purkukohteessa
 - Hyödyntämiskelpoisten muovijakeiden valinnassa otettiin huomioon esimerkiksi kohteessa olevien muovijakeiden eroteltavuus, puhtaus ja volyymit
 - Lisäksi valittujen muovien muovilaadut tuli olla hyödyntämiskelpoisia ja niille täytyi löytyä potentiaalinen kierrätysvaihtoehto, joka on käytössä nyt tai lähitulevaisuudessa



Mallinnettava esimerkkikohde

- Kohteen tarkasteltaviksi muovijakeiksi valikoitui:
 - Muoviviemärit, ilmanvaihdon muoviputket (PP)
 - Irrotettavissa olevat lattialämmitysputket (PEX)
 - Valikoidut eristemateriaalit (EPS, XPS)
 - Muovimatot (PVC)
 - Oletettu sekalainen muovifraktio (arvio 2 m-% koko kohteen kokonaismuovivolymistä)
- Kohteen muovivolyymit tonneina johdettiin kohteen kokonaismuovimäärästä (kg/br-m^2) ja bruttoalasta (br-m^2)
 - Hyödynnettävää muovia kohteessa 11.2 tonnia (sisältää sekalaisen muovifraktion 3.2 tonnia)
 - Määrä noin 5% kohteen kokonaismuovimäärästä (ilman sekalaista muovifraktiota)
 - Paljon hyödyntämiskelvotonta muovia esimerkiksi pinnoitteissa
- Valikoitujen purkumuovien prosessoinnin vaihtoehdot kartoitettiin VTT:n asiantuntijoiden kanssa
 - Purkuoperaattorin esikäsittelyprosessit kartoitettiin alan toimijan avulla

Mallinnettavat muovijakeet



Kuva 1. Mallinnettavan esimerkkikohteen muovijakeet ja -volyymit (t=tonni).

Mallinnettava esimerkkikohde

- Viereisessä kuvassa on esitetty esimerkkikohteen mallinnettavat muovijakeet ja volyymit
 - Lopullinen laskennallinen malli tulee olemaan geneerisempi ja kattavampi pyrkien ottamaan huomioon laajemmin myös muita purkukohteita
 - Huom! Muovien käyttö vaihtelee voimakkaasti purkukohteittain, joten esimerkkikohteen muovijakeita ja volyymejä ei voi suoraan skaalata toiseen purkukohteeseen
- Laskennallisessa mallissa käyttäjä voi muokata purkukohteen muovijakeiden volyymeja (massa)
 - Mallissa on mahdollista huomioida sekalainen ja riittävän puhdas muovifraktio (m-% kaikesta kohteesta olevasta muovista)

Purkukohde

Purkukohteen kokonaispinta-ala		7074	br-m ²
Muovit kaikki		22.82	kg/br-m ²
Syntyvät muovivolyymit			
Muoviviemärit	PP	0.253	kg/br-m ²
Ilmanvaihdon muoviputket	PP	0.4217	kg/br-m ²
Lattialämmitysputki	PEX	0.252	kg/br-m ²
Muovimatot/lattiat	PVC	0.125	kg/br-m ²
Lattian lämmöneristys	EPS	0.079	kg/br-m ²
Katon yläpohjan eristys	XPS	0	kg/br-m ²
Yläpohjan suodatinpaperi	PP	0	kg/br-m ²
Kalvomuovit	LDPE	0	kg/br-m ²
Sekalainen fraktio	n/a	2 %	m-% kaikesta muovista

Syntyvät muovitonnit

Muoviviemärit	PP	1.79	t/purkukohde
Ilmanvaihdon muoviputket	PP	2.98	t/purkukohde
Lattialämmitysputki	PEX	1.78	t/purkukohde
Muovimatot/lattiat	PVC	0.88	t/purkukohde
Lattian lämmöneristys	EPS	0.56	t/purkukohde
Katon yläpohjan eristys	XPS	0.00	t/purkukohde
Yläpohjan suodatinpaperi	PP	0.00	t/purkukohde
Kalvomuovit	LDPE	0.00	t/purkukohde
Sekalainen muovifraktio	n/a	3.23	t/purkukohde
Yhteensä ilman sekalaista muovifraktiota		8.00	t/purkukohde
Yhteensä sis. sekalaisen muovifraktion		11.2	t/purkukohde

Kuva 2. Esimerkkikuva laskennallisen työkalun etusivulta, johon on lisätty mallinnettavan esimerkkikohteen muovijakeet ja -volyymit.

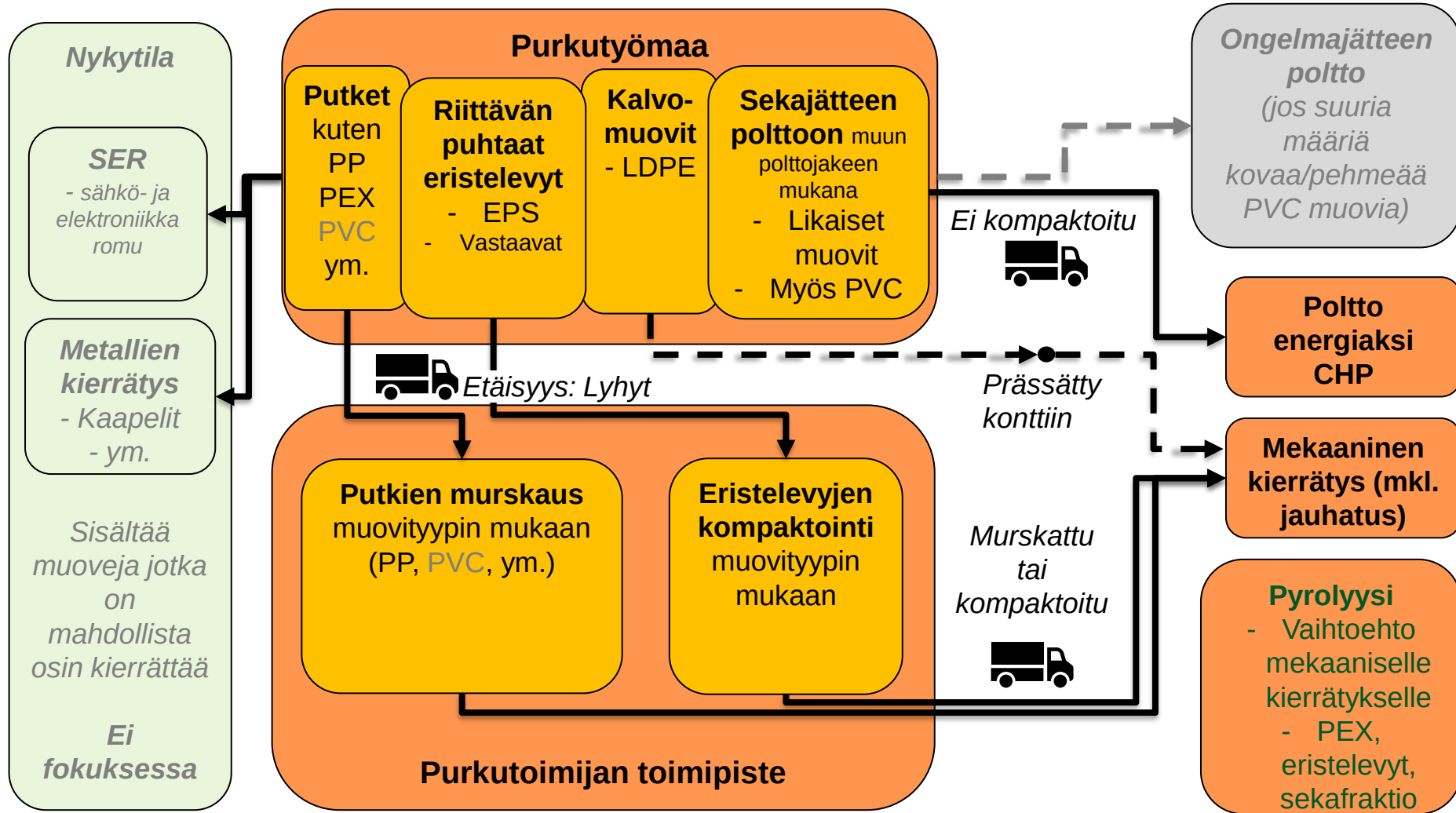
Mallinnettavien muovien laadut ja eri skenaariot esimerkkikohteessa

Käyttökohde/ sijainti	Muovilaatu	Case 0 Referenssi	Case 1 Mekaaninen kierrätys	Case 2 Pyrolyysi ja mekaaninen kierrätys	Muut huomiot
Muoviviemärit, ilmanvaihdon muoviputket	Polypropeeni (PP)	Energiakäyttö	Mekaaninen kierrätys	Mekaaninen kierrätys	Muovilaatuna voi olla myös esimerkiksi PP, PE ja PVC. Muoviviemärit voivat todellisuudessa olla likaisia, ja voivat vaatia esimerkiksi eritasoista pesua ennen jatkokäyttöä. Lisäksi vanhoissa putkissa kierrätyskelpoisuuden arviointi voi olla vaikeaa.
Lattialämmitys- putket	Polyeteeni (PEX)	Energiakäyttö	Jauhatus täyteaineeksi	Pyrolyysi	Kertamuovi, ei termoplastinen. Epävarmuustekijä: Markkinat/toimijat Suomessa?
Eristemateriaalit	Polystyreeni (EPS, XPS)	Energiakäyttö	Mekaaninen kierrätys	Pyrolyysi	Voi sisältää palonestoaineita, kuten bromia, vaikeuttaen kierrätystä. Voi myös sisältää muita epäpuhtauksia (liimat ja maalit). Epävarmuustekijä: Markkinat/toimijat Suomessa?
Muovimatot	Polyvinyylikloridi (PVC)	Energiakäyttö	Energiakäyttö	Energiakäyttö	Haasteellista kierrättää. Voi myös sisältää mm. liimoja ja likaa. Epävarmuustekijä: Markkinat/toimijat Suomessa? Euroopassa kehitetty erilaisia kierrätysmenetelmiä. Lisätietoa PVC:n kierrätyksestä liitteessä (liite 2).
Sekalainen muovifraktio	Seka	Energiakäyttö	Energiakäyttö	Pyrolyysi	Tuotteissa mahdollisesti useita materiaaleja. Voi mahdollisesti sisältää myös osin kontaminoitua muovia. Ei saa kuitenkaan sisältää hiekkaa tai sementtijäämiä.

Mallinnettavat skenaariot

- Laskennallisessa mallissa käyttäjän asettamia muovilaatuja- ja volyymejä hyödynnetään arvioitaessa purkumuovien kierrätyksen taloudellista kannattavuutta ja CO₂-päästöjä nykytilanteen ja kahden eri skenaarion välillä:
 - **Case 0.** Referenssi eli nykyinen tilanne, jossa muovijakeita ei kierrätetä. Kaikki hyödyntämiskelpoiset muovijakeet ohjataan sekalaiseksi energiajätteeksi.
 - **Case 1.** Hyödyntämiskelpoiset muovijakeet kierrätetään mekaanisesti joko muovigranulaateiksi, tai jauhetaan täyteaineiksi. Sekalainen muovifraktio ja PVC energiajätteeksi.
 - **Case 2.** Granuloitavaksi kelpaavat muoviputket ohjataan mekaaniseen kierrätykseen. PVC energiakäyttöön. Muut hyödyntämiskelpoiset muovijakeet pyrolyysiin.
- Kaikissa skenaarioissa optiona on mahdollisuus ohjata PVC ongelmajätteen polttoon
- Malli ei huomio nykytilan mukaista SER- ja metallien kierrätyksen mukana kulkeutuvaa muovijaetta
 - Mahdollinen lisäpotentiaali muovin kierrätykselle, johon purkutoimija ei voi vaikuttaa suoraan
- Seuraavalla kalvolla skemaattinen kuva toteutetusta mallista





Laskennan taustaa - kuljetukset ja kustannukset

- Laskentaa varten käyttäjä pystyy muokkaamaan:
 - Kuljetuskustannuksia (täysi ja tyhjä kuorma) (€/km)
 - Muovien keräys ja kuljetus vaihtolavoilla (33 m³)
 - Kalvomuovien keräys ja kuljetus muovijätepuristimella (20 m³)
 - Muovijakeiden tiheydet huomioitu kuljetuksissa
 - Purkutoimijan toteuttaman esikäsittelyn vaatimia sisäisiä kuljetusetäisyyksiä (km)
 - Esikäsittelyvaihtoehtoina muoviputkien murskaus ja eristeiden kompaktointi
 - Purkutoimijan toteuttaman esikäsittelyn esikäsittelykustannuksia (€/t)
 - Jakeiden eri hyödyntämisvaihtoehtojen porttimaksuja (€/t)
 - Jakeiden eri hyödyntämisvaihtoehtojen kuljetusetäisyyksiä (km)
- Esimerkkikohteen laskemissa käytetyt oletukset vieressä olevan kuvan keskisarakkeessa
 - Huom! Kuvassa esitetyt hinnat ja etäisyydet ovat laskentaa varten tehtyjä arvioita
 - Mallin käyttäjän arvioi omat kuljetusetäisyydet, esikäsittelykustannukset ja porttimaksut

Kuljetuskustannus	tyhjä	0.8	1.0	1.2	€/km
	täysi	0.9	1.1	1.3	€/km
Kuljetusetäisyys purkukohteesta esikäsittelyyn					
	Murskaus	5	10	50	km
	Kompaktointi	5	10	50	km
Purkutoimijan esikäsittelykustannukset					
	Murskaus (putket)	50	75	100	€/t
	Kompaktointi (eristeet)	50	75	100	€/t
Kuljetusetäisyydet jatkokäsittelyyn					
		BEST	STATIC	WORST	
	Kuljetusetäisyys purkutoimijan oma käsittely	0	5	10	km
	Kuljetusetäisyys energiakäyttö	10	50	150	km
	Kuljetusetäisyys mekaaninen kierrätys/jauhatus	50	50	300	km
	Kuljetusetäisyys pyrolyysi	50	50	300	km
	Kuljetusetäisyys ongelmajätteen poltto	10	50	150	km
Porttimaksut					
		BEST	STATIC	WORST	
	Jätetäyttö energia-/sekajätteeksi	100	200	300	€/t
	Jätetäyttö murskattu putki	0	10	50	€/t
	Kompaktoitu muovijäte (eristeet)	0	10	50	€/t
	Jätetäyttö kalvomuovit	0	10	50	€/t
	Jätetäyttö murskattu kovamuovi (PEX)	0	10	50	€/t
	Jätetäyttö ongelmajätteelle (PVC)	1000	1400	1800	€/t
	Jätetäyttö pyrolyysiin menevä jäte	0	50	100	€/t

Kuva 3. Esimerkkikuva laskennallisen työkalun etusivulta, johon on lisätty kuljetusetäisyyksiä, sekä kuljetukseen ja käsittelyyn liittyviä kustannuksia.

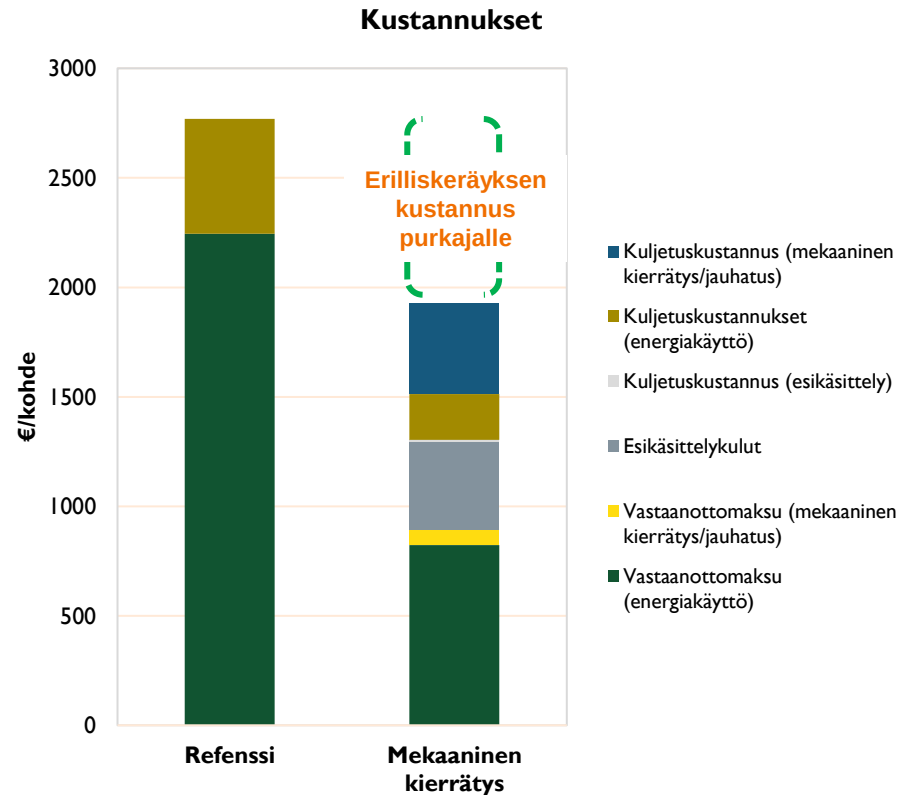
Laskennan taustaa - CO₂-päästölaskennassa huomioidut tekijät

- Kuljetuksen päästöt ja kuljetukseen vaadittavan polttoaineen valmistuksen päästöt
- Muovin polton päästöt
- Kierrätysvaihtoehtojen energiankulutus (mekaaninen kierrätys/jauhatus/pyrolyysi)
- Pyrolyysituotteiden poltto (pyrolyysiöjy, -kaasu ja -koksi)
- Sakkofunktiot:
 - Sakkofunktioiden avulla pyritään siihen, että vertailuissa olevissa skenaarioissa syntyy saman verran tuotteita ja energiaa (sähkö- ja lämpö) ja näin päästölaskelmista saadaan vertailukelpoisia
 - Skenaarioissa käytetyt sakkofunktiot lihavoituna alla olevassa taulukossa

Referenssiskenaario	Vaihtoehto	Skenaario, jossa sakkofunktiota käytetään
Tuottamatta jäävien kierrätysgranulaattien valmistus neitseellisestä muovista	Tuotetut kierrätysgranulaatit mekaanisesti kierrätystä muovista	Case 1 Case 2
Muovin polton energiatuotanto (sähkö- ja lämpö)	Korvaava energiatuotanto Suomen sähkön- ja lämmöntuotannon keskimääräisillä päästökertoimilla	Case 1 Case 2
Öljyn poltto	Tuotetun pyrolyysiöljyn poltto	Case 2

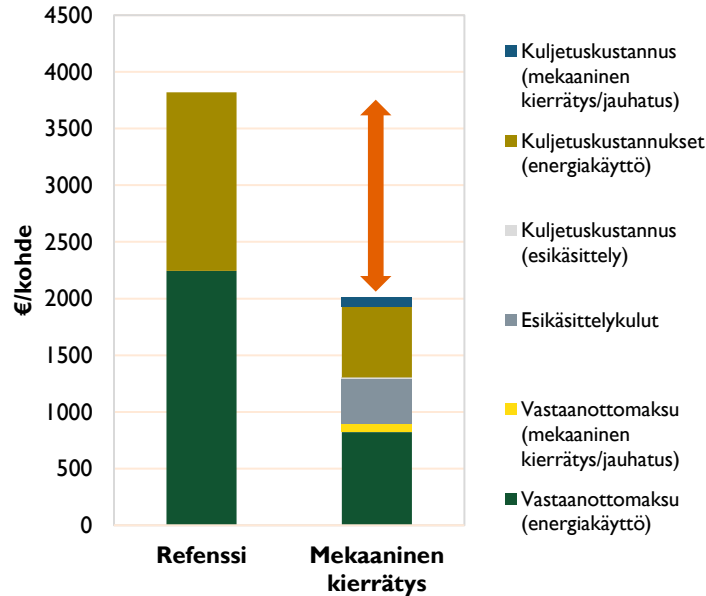
Esimerkkituloksia – referenssi vs case I

- Case I:n (mekaaninen kierrätys) tuotteet kiertoon menevästä muovista:
 - Kierrätetty PP ja PS granulaatti
 - PEX-jauhe
- Mekaanisen kierrätyskenaarion kustannukset ovat matalammat referenssiin verrattuna
 - Erotus (noin 840 €) ilmaisee säästöpotentiaalin, joka olisi käytettävissä erilliskeräyksen toteuttamiseen
- Mekaanisen kierrätyksen vastaanottomaksut ovat pienemmät kuin energiakäytön muodostaen kustannusvähenemän
- Esimerkissä etäisyydet energiapolttoon ja kierrätyskohteisiin samat (50 km)

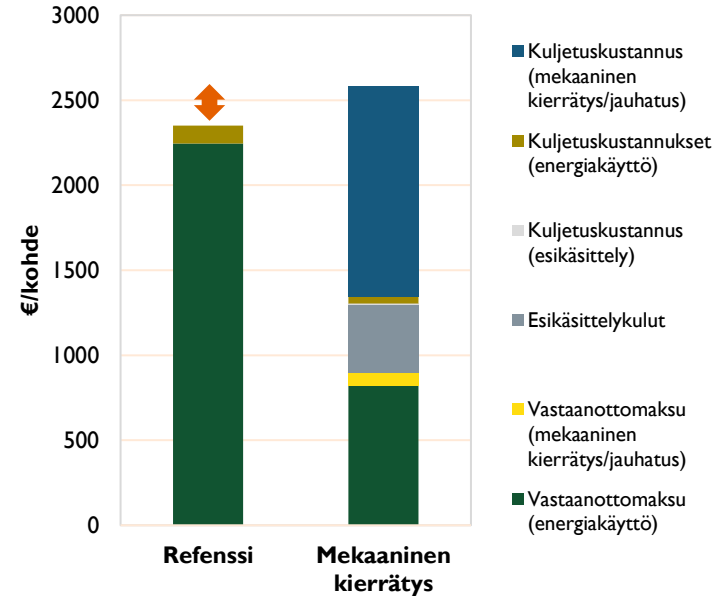


Skenaarioiden välinen kustannusero vahvasti riippuvainen jatkokäsittelykohteiden etäisyyksistä

Kustannukset; energiakäyttö 150 km,
mekaaninen kierrätys/jauhatus 10 km



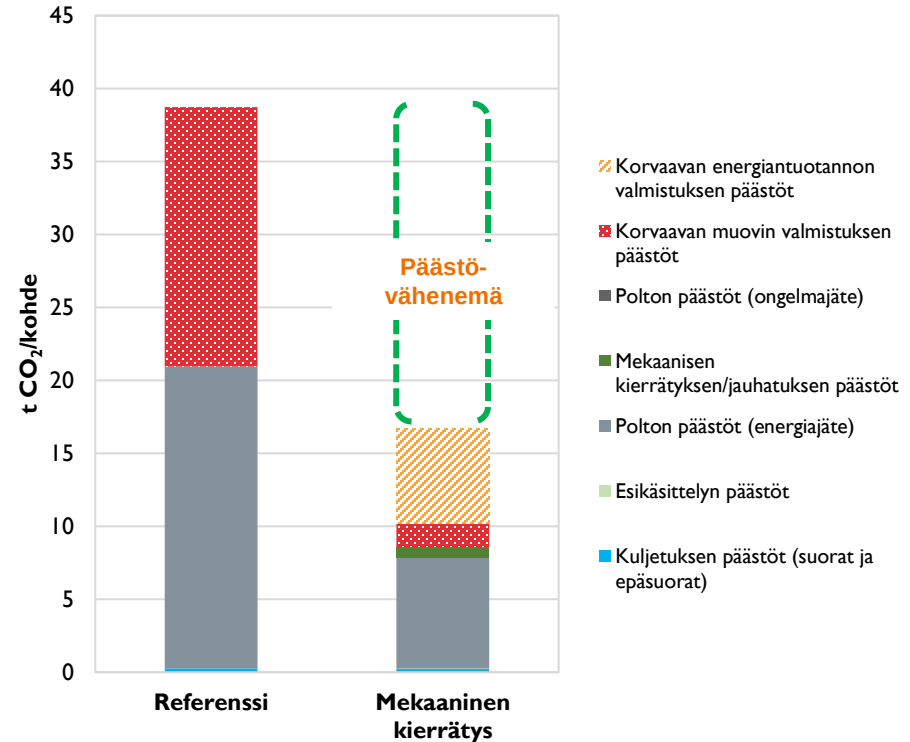
Kustannukset; energiakäyttö 10 km,
mekaaninen kierrätys/jauhatus 150 km



Esimerkkituloksia – referenssi vs case I

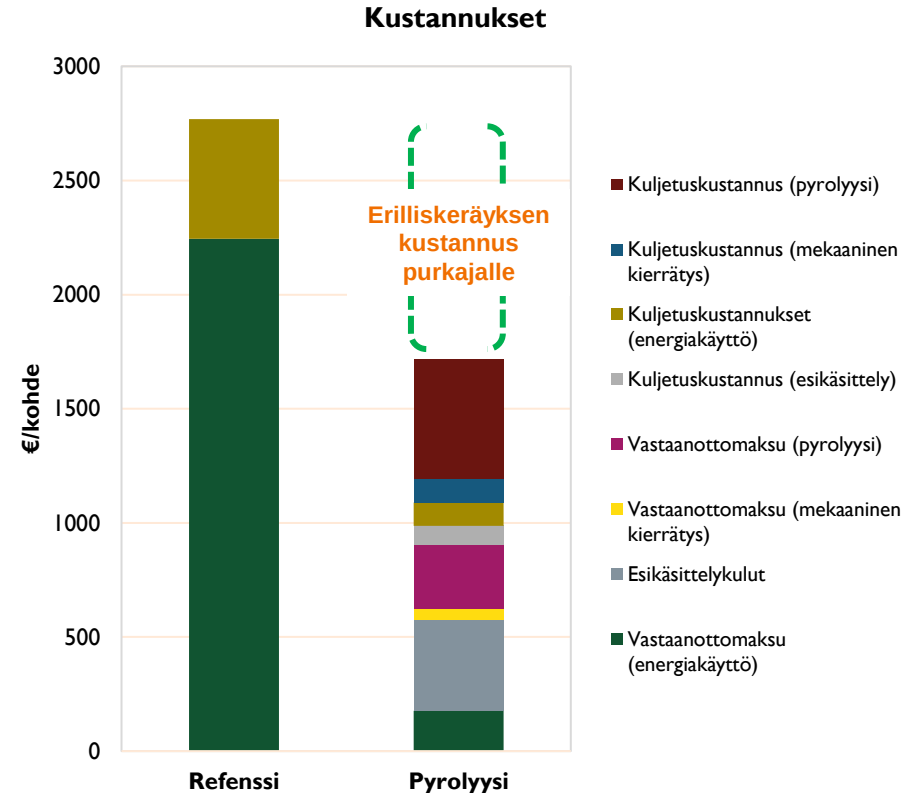
- Mekaanisessa kierrätyksessä syntyy päästövähennelmä referenssiin verrattuna
 - Pätee ilman ja sisältäen ”sakkofunktiot”
- Kuljetuksen osuus skenaarioiden kokonaispäästöissä hyvin pieni
- Neitseellisen (korvaavan) muovin valmistus muodostaa merkittävän CO₂-päästön referenssissä (”sakkofunktio”)
- Menetetystä energiantuotannosta aiheutuvat päästöt mekaanisessa kierrätyksessä ovat matalammat kuin muovin polton aiheuttamat päästöt referenssissä

CO₂-päästölaskenta



Esimerkkituloksia – referenssi vs case 2

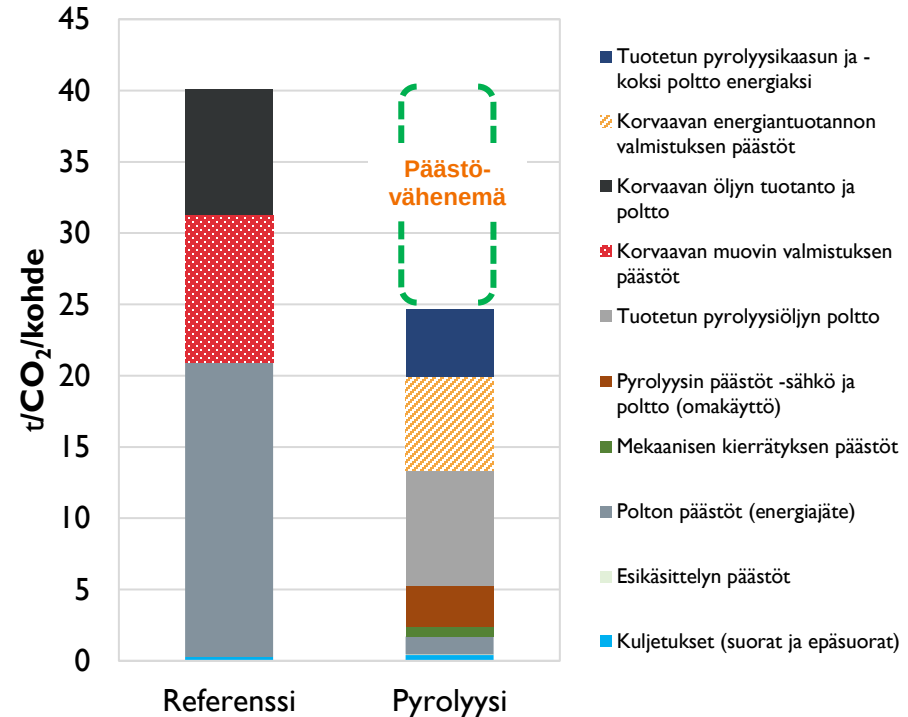
- Case 2:n (pyrolyysi) tuotteet kiertoon menevästä muovista:
 - Kierrätetty PP granulaatti
 - Pyrolyysiöljy
- Pyrolyysi-skenaarion kustannukset ovat matalammat referenssiin verrattuna
 - Erotus (noin 1050 €) ilmaisee säästöpotentiaalin, joka olisi käytettävissä erilliskeräyksen toteuttamiseen
- Pyrolyysin ja mekaanisen kierrätyksen vastaanottomaksut ovat pienemmät kuin energiakäytön muodostaen kustannusvähenemän
- Esimerkissä etäisyydet energiapolttoon ja kierrätyskohteisiin samat (50 km)



Esimerkkituloksia – referenssi vs case 2

- Pyrolyysi –skenaariossa syntyy päästövähennelmä referenssiin verrattuna
 - Pätee ilman ja sisältäen ”sakkofunktiot”
- Neitseellisen (korvaavan) muovin valmistus ja öljyn tuotanto ja poltto muodostavat merkittävän CO₂-päästön referenssissä (”sakkofunktiot”)
- Pyrolyysi –skenaariossa huomioidaan korvattavan energiantuotannon päästöt verrattuna referenssin tuotantoon (”sakkofunktio”)
- Kuljetusten osuus on pieni verrattuna muihin päästöihin
- Öljyn poltto referenssissä ja pyrolyysiöljyn poltto pyrolyysi -skenaariossa ovat samansuuruiset
 - Öljyn päästökertoimet raskaan polttoöljyn mukaan
- Pyrolyysikaasu (netto) ja koksi hyödynnetään casessa energian tuotannossa –osa kaasusta poltetaan prosessin omaan käyttöön
 - Päästökertoimet maakaasun ja kivihiilen polton mukaan

CO₂-päästölaskenta



Johtopäätöksiä ja pohdintaa

- Vain pieni osa mallinnettavana olevan kohteen muovista oletettiin hyödyntämiskelpoiseksi
 - Syntyvät muovijakeet purkukohteissa ovat kuitenkin hyvin rakennusspesifejä ja riippuvat muun muassa suunnittelijan valinnoista, rakennustyyppistä (esimerkiksi toimistotalo vs asuinrakennus) ja rakennuksen iästä
- Tietoa purkukohteiden sisältämistä muovijakeista on rajallisesti
 - Esimerkiksi muovilaatujen määrät ja volyymit kohteessa, purkukohteiden sijaintikeskittymät
 - Yleispätevien johtopäätösten tekemiseen vaaditaan laajempi tietopohja purkukohteissa olevista muovijakeista
 - Nyt tulokset edustavat vain yhtä kohdetta
- Kustannusero nykytilan ja vaihtoehtoisten skenaarioiden välillä on mallinnettavassa esimerkkikohteessa matala
 - Erilliskeräyksen taloudellinen kannattavuus on täten haaste
 - Huomiota tulisi kiinnittää jo rakennusten suunnitteluvaiheessa muovijakeiden kierrätettävyyteen
- Jos muovin erilliskeräystä ei saada kannattavaksi purkukohteessa, kierrätystavoitteet kannattaisi keskittää myös muihin purkukohteen materiaaleihin, jotka saataisiin kustannustehokkaasti erilliskerättyä ja jatkokäsiteltyä yhdessä



Johtopäätöksiä ja pohdintaa

- Esimerkkinä olevan kohteen hyödynnettävien muovien kartoituksessa on oletettu, että kierrätettäville muovijakeille löytyy toimijat ja markkinat Suomessa
 - Tämä on todellisuudessa epävarmuustekijä, eikä kysyntää/toimijoita välttämättä ole
- Kalvomuovit (LDPE) ovat potentiaalinen muovijae purkukohteissa jatkokäsittelyyn
 - Esimerkkikohteen datassa ei hyödynnettäviä kalvomuoveja
 - Myös muoviputkia on purkukohteissa useampia muovilaatuja tarjoten potentiaalia kierrätykselle
- Voisiko kaapeli- ja SER –romun kautta saada muovia kustannustehokkaasti kiertoon?
 - Tällä hetkellä kaapelit ja SER –romu kierrätetään
 - Talteen otetaan esim. metallit
- *Huomioitavaa päästölaskennassa. Mallissa kierrätysgranulaattien päästölaskennassa on huomioitu kierrätysprosessin sähkönkäyttö ja polttoaineen kulutus, sekä tarvittavan polttoaineen valmistus kuljetuksia varten*
 - *Todellisuudessa CO₂e-päästöt ovat jonkin verran suuremmat, kun mukaan otetaan myös markkinaprosessi, mahdolliset lisäaineet ja niiden valmistus sekä kaikki kuljetukseen liittyvät päästöt jätteiden synnystä aina valmiin tuotteen toimittamiseen markkinoille asti*



Projektin jatko

- Mallinnustyökalusta luodaan avoin ja julkinen nettityökalu, jolla käyttäjä voi alustavasti arvioida kustannus- ja päästörakenteen muutosta, mikäli halutaan tähdätä purkukohteen muovien kierrätysasteen nostoon
- Työn lopullinen yhteenveto toimitetaan erikseen myöhemmin nettityökalun valmistuttua. Oikeus muutoksiin pidätetään.

Mahdollinen jatkotutkimus

- Haasteena tällä hetkellä on, että tietopohja purkukohteiden sisältämistä muovijakeista on rajallista
 - Tarve laajentaa tietopohjaa muovien osalta
- Nyt kierrätyksen taloudellista kannattavuutta on katsottu ainoastaan purkutoimijan kannalta. Tarkastelu ei ota kantaa eri kierrätysvaihtoehtojen suoraan kannattavuuteen
 - Tekno-ekonomiset selvitykset kohdekierrätysprosesseista
- Kierrätystavoitteita voisi keskittää myös muihin purkukohteen materiaaleihin, jotta saataisiin kustannustehokkuutta eri jakeiden purkuun, erilliskeräykseen ja mahdollisesti jatkokäsittelyyn soveltuvien osien



Liitteet

Liite I. Laskennan referenssiluettelo I/7

Parametri	Arvo	Yksikkö	Lähde
Muovijäte, päästökerroin	74.1	g/MJ	1
Muovijäte, tehollinen lämpöarvo	25	GJ/t	1
Sähköntuotannon keskimääräinen päästökerroin	146	kgCO ₂ /MWh	2,3
Kaukolämmöntuotannon keskimääräinen päästökerroin	148	kgCO ₂ /MWh	3
Muovijätteen polton kokonaishyötysuhde	90	%	4
Polttolaitoksen hyötysuhde (sähkö)	40	%	4
Polttolaitoksen hyötysuhde (lämpö)	60	%	4
Dieselin valmistus tankkiin saakka "Well to tank"	18.9	g/MJ	5
Diesel 12% bio energiasisältö	35.6	MJ/l	6
Muovin valmistus (neitseellinen, sis. suorat ja epäsuorat päästöt)			
PP	2.287	kg/kg	7
PE	2.49	kg/kg	7
PS	2.97	kg/kg	14
PVC	1.92	kg/kg	14



Liite I. Laskennan referenssiluettelo 2/7

Parametri	Arvo	Yksikkö	Lähde
Mekaanisen kierrätyksen sähkönkulutus			
Murskaus	250	MJ/t	8
Esimurskatun putkirouheen murskaus	150	MJ/t	Arvio perustuen murskaukseen
Pesu	1700	MJ/t	8
Lajittelu	250	MJ/t	9
Granulointi	1400	MJ/t	8
Kompaktointi	250	MJ/t	Arvio perustuen murskaukseen
Vaihtolavan tilavuus	33	m ³	10
Vaihtolavan tyhjäpaino	2.2	t	10
Muovijätepuristimen tilavuus	20	m ³	11
Muovin massa puristettuna	3.5	t	12
Muovijätepuristimen tyhjäpaino	5	t	12
Kuljetuskustannukset			
Tyhjä	0.8-1.2	€/km	13
Täysi	0.9-1.3	€/km	13

Liite I. Laskennan referenssiluettelo 3/7

Parametri	Arvo	Yksikkö	Lähde
Irtotiheys muovi	0.035	t/m ³	15
Eristelevyn tiheys (kompaktoimaton)	0.025	t/m ³	18
Jätemuovin kuiva-ainepitoisuus	95	%	Arvio
Prosessihäviöt mekaaninen kierrätys	5	%	Arvio
PP lämpöarvo LHV	44.6	MJ/kg	16
PE lämpöarvo LHV	44.6	MJ/kg	16
PS lämpöarvo LHV	40	MJ/kg	16
PVC lämpöarvo LHV	19.2	MJ/kg	16
Maakaasu poltto päästökerroin	55.3	tCO ₂ /TJ	1
Raskaan polttoöljyn poltto päästökerroin	77	tCO ₂ /TJ	1
Kivihiilen poltto päästökerroin	93.1	tCO ₂ /TJ	1
Maakaasun tuotannon päästöt	12.7	tCO ₂ /TJ	19
Raskaan polttoöljyn tuotannon päästöt	6.6	tCO ₂ /TJ	19
Kivihiilen tuotannon päästöt	16	tCO ₂ /TJ	19

Liite I. Laskennan referenssiluettelo 4/7

Parametri	Arvo	Yksikkö	Lähde
Pyrolyysi			
Öljyn brutto saanto kuiva-aineesta	47 %	m%	20
Kaasun netto saanto kuiva-aineesta	35 %	m%	20
Koksin brutto saanto kuiva-aineesta	2 %	m%	20
Koksin lämpöarvo arvio (perustuu HDPE jätemuoviin)	18.8	MJ/kg LHV	20
Kaasun lämpöarvo arvio (muuttuu hieman taseen mukana)	42.1	MJ/kg LHV	20
PP pyrolyysiöljy	40.8	MJ/kg LHV	20
PE pyrolyysiöljy	40	MJ/kg LHV	20
PS pyrolyysiöljy	43	MJ/kg LHV	20
PVC pyrolyysiöljy	21.1	MJ/kg LHV	20
PP osuus sekalainen muovifraktio	33 %	m%	Oletus
PE osuus sekalainen muovifraktio	33 %	m%	Oletus
PS osuus sekalainen muovifraktio	33 %	m%	Oletus
PVC osuus sekalainen muovifraktio	1 %	m%	Oletus
Ominaisähkön kulutus	0.36	MWh/t syöttö	21

Liite I. Laskennan referenssiluettelo 5/7

Parametri	Arvo	Yksikkö	Lähde
Kuljetuspäästöt ja polttoaineen kulutus			
Jakelukuorma-auto 15 t kantavuus 9 t	9	t	6
Kantavuus	378	CO ₂ e g/km	6
Maantieajo, tyhjä	449	CO ₂ e g/km	6
Maantieajo, täysi	472	CO ₂ e g/km	6
Katuajo, tyhjä	681	CO ₂ e g/km	6
Katuajo, täysi	444	CO ₂ e g/km	6
Jakelu, tyhjä	611	CO ₂ e g/km	6
Jakelu, täysi	16	L/100 km	6
Maantieajo, tyhjä	19	L/100 km	6
Maantieajo, täysi	20	L/100 km	6
Katuajo, tyhjä	29	L/100 km	6
Katuajo, täysi	18	L/100 km	6
Jakelu, tyhjä	26	L/100 km	6
Jakelu, täysi	9	t	6

Liite I. Laskennan referenssiluettelo 6/7

Parametri	BEST	STATIC	WORST	Yksikkö	Lähde
Jätmaksu purkumuovijätteelle (energiaksi)	100	200	300	€/t	17
Jätmaksu mekaaninen kierrätys (lajiteltu putki)	0	10	50	€/t	13
Jätmaksu muu mekaaninen kierrätys	0	10	50	€/t	13
Jätmaksu jauhatus	0	10	50	€/t	13
Jätmaksu ongelmajätteelle (PVC)	150	175	200	€/t	13
Jätmaksu pyrolyysiin menevä jae*	0	50	100	€/t	13
Ongelmajätteen käsittely	1000	1400	1800	€/t	12
Esikäsittely toimijan työmaalla	50	75	100	€/t	12
Toimijan oma murskaus mekaaniseen kierrätykseen (sis. putket, eristeet, pex)	100	150		€/t	12

*Pyrolyysin todelliset vastaanottohinnat voivat elää, ja nämä riippuvat tulevaisuudessa pyrolyysioperoijan todellisista kustannuksista ja pyrolyysiöljyn edelleen myyntihinnasta

- 1 Statistics Finland (2021). Fuel classification. Saatavilla: https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html
- 2 SYKE (2019). Y-HIILARI, Yrityksen hiilijalanjälkilaskuri. Saatavilla: https://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus__kehittaminen/Kulutus_ ja_tuotanto/Laskurit/Yhiilari
- 3 Motiva (2021). CO₂-päästökertoimet. Saatavilla: https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto_suomessa/co2-paastokertoimet
- 4 Vantaan Energia (2015). Tehokas yhteistuotanto. Saatavilla: <https://www.vantaanenergia.fi/ykv/ykv-2015/tehokas-yhteistuotanto/>
- 5 Prussi, M., Yugo, M., De Prada, L., Padella, M., Edwards (2020). JEC Well-To-Wheels report v5. EUR 30284 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-20109-0, doi:10.2760/100379, JRC121213. Saatavilla: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7a2ecd8-fed8-11ea-b44f-01aa75ed71a1/language-en>
- 6 Teknologian tutkimuskeskus VTT (2017). LIPASTO yksikköpäästöt -tietokanta. Saatavilla: <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tunnusluvut/tunnusluvuttie.htm>
- 7 Ecoinvent database, v. 3.7.1
- 8 Myllymaa, T., Moliis, K., Tohka, A., Rantanen, P., Ollikainen, M. ja Dahlbo, H. (2008). Jätteiden kierrätyksen ja polton käsittelyketjujen ympäristökuormitus ja kustannukset. Inventaarioraportti. Saatavilla: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/39792>
- 9 Jeswani, H., Kruger, C., Russ, M., Horlacher, M., Antony F., Hann, S. ja Azapagic, A. (2021). Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery. Science of the Total Environment (769). Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144483>.
- 10 ETS Logistika (2021). Konttien mitat. Saatavilla: <https://www.etslogistika.ee/fi/hyva-tietaa/konttien-mitat/>
- 11 Euopress (2021). Combimax&Combi. Saatavilla: <https://euopressgroup.com/fi/combimax-combi/>
- 12 Alan toimijan asiantuntija-arvio
- 13 VTT:n asiantuntija-arvio
- 14 Kissinger, M., Sussmann, C., Moore, J. Rees, W.E (2013). Accounting for Greenhouse Gas Emissions of Materials at the Urban Scale-Relating Existing Process Life Cycle Assessment Studies to Urban Material and Waste Composition. Saatavilla: <https://pics.uvic.ca/sites/default/files/uploads/publications/Accounting%20for%20GHG%E2%80%A6Moore.pdf>
- 15 Koistinen, E. (2018). Muovipakkausjätteen käsittelyvaihtoehtojen ilmastomuutosvaikutusten ja jätehuoltoyhtiölle muodostuvien kustannusten arviointi. Saatavilla: <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/158893>
- 16 Ioelovich (2018). Energy Potential of Natural, Synthetic Polymers and Waste Materials -A Review. Academic Journal of Polymer Science (1).
- 17 Asiantuntija-arvio VS Purku Oy; Kiertotalous muuttuvassa sääntely-ympäristössä – purkujätteen hyödyntäminen 21.4.2021 (webinaari)
- 18 Finnfoam (2021). Koostumus ja rakenne. Saatavilla: <https://www.finnfoam.fi/tuotteet/finnfoam-eristelevyt/koostumus-ja-rakenne>
- 19 Sokka, L. Correia, S., Koljonen, T. (2018). Lämmityspolttoaineiden tuotannon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt. Saatavilla: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2018/T336.pdf>
- 20 Sharuddin, Abnisa, Daud, Aroua (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. Energy Conversion and Management 115 pp 308-326
- 21 Fivga, Dimitrou (2018). Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment. Energy 149 pp 865-874

Liite 2. PVC purkutyömaalla ja kierrätys

- Nykykäytäntö: **PVC:tä menee käytännössä polttoon.** Rinnakkaispoltossa pieni määrä PVC:tä epäpuhtautena muun materiaalin joukossa ei estä energiahyödyntämistä. Suuremmat määrät tulee ohjata ongelmajätteen polttoon. Tulevaisuudessa pienempiinkin määriin /osuuksiin tultaneen kiinnittämään enemmän huomiota.
 - **Muu rakennustyömailla syntyvä muovijäte (poislukien kalvomuovit)** lajitellaan yleisesti **energia- tai sekajätteeseen** ja **hyödynnetään** edelleen **energiana**. Sisältää tyypillisesti kovamuoveja, erilaisia putkia sekä **PVC:tä**. Materiaali on sekalaista, voi olla likaista ja/tai vaikeasti tunnistettavaa. Materiaalihyödyntäminen on nykytilanteessa haastavaa (Ramboll 2020)
- PVC ei sovellu kierrätyspolttoaineen valmistukseen suuren klooripitoisuuden takia (Poropudas 2011)
- **Ongelmajätteen vastaanottomaksu** on korkea (n. 1400-1800 €/t). Samoin PVC:n manuaalinen erotus purkutyömaalla aiheuttaa lisäkustannuksia
 - Esimerkki 1: NCC:n rakennustyömaan jätelajitteluohjeistuksessa työntekijöille PVC menee sekajätteeseen (-> edelleen polttoon) (2020 Ramboll)
 - Esimerkki 2: Delete (https://www.delete.fi/wp-content/uploads/Lajitteluohjeet_delete.pdf) rakennus- ja purkutoiminnasta syntyvään jätteeseen liittyen: PVC:tä voi olla sekä hyödyntämiskelpoisena jakeena että erikoiskäsiteltävän jätteen seassa (letkut, putket, sähköjohdot, johdinten eristeet, kaapeleiden vaipat, listat, muovimatot, tapetit, kalvot, pressut ja työkalusineet)
- **Esimerkki tutkimuksesta: Rakennustyömaan muovijätevirrat ja lajittelun ympäristövaikutukset** (Kinnunen ja Kupiainen 2019):
 - CIRCWASTE-hanke. Tutkimuskohteena oli rakennustyömaan muovipuristimen sisältö, johon oli kerätty työmaalta syntyvät muovijätteet lukuun ottamatta PVC ja styrox –muoveja
 - Rakennustyömaalla on pyritty lajittelemaan jätteet 13 eri materiaalin mukaan. Mm. kiviaines, metalli, eristevilla, **muovi (ei PVC)**, poltettava jäte, kartonki, käsitelty puu, puhdas puu, **PVC putket**, kipsi, vaaralliset jätteet

2020 Ramboll. Rakentamisen muovit, Muovitiekartta Suomelle 9/2020. Taustaselvitys. <https://muovitiekartta.fi/toimenpiteet/parannetaan-muovien-tunnistamista-rakennuksissa-seka-muovijatteen-lajittelua-rakennustyomailla/>

2011 Poropudas. Polyvinyylikloridin (PVC) kierrätys ja uusiokäyttö. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:ty-201212111354>

2019 Kinnunen ja Kupiainen. Rakennustyömaan muovijätevirrat ja lajittelun ympäristövaikutukset. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201905037456>

Liite 2. PVC kierrätysprosesseista

- Hyvälaatuisen lopputuotteen saamiseksi **jäte on kerättävä sovelluskohteittain sekä kova ja pehmeä PVC kierrätettävä erikseen** (Poropudas 2011)
- **Kova PVC jäte on paremmin mekaanisesti kierrätettävissä** (Poropudas 2011)
 - PVC muoviputket (kuten myös PE ja PP) on mahdollista kierrättää, jos purkukohteesta niitä löytyy (https://www.plastics.fi/putkijaosto/muoviputkijarjestelmien_kierratys/). Ongelmaa putkien kierrätyksessä aiheuttaa epäpuhtaudet (metalli, betoni, irtomaa, muut ilmeiset epäpuhtaudet)
 - Muualla Euroopassa käytetään paljon PVC:tä ikkunapuitteissa, toisin kuin Suomessa (VTT:n asiantuntija)
- **Esimerkkejä pehmeän PVC:n kierrätysprosesseista** (Poropudas 2011):
 - **Pehmeät PVC lattiapäällysteet, Saksa:** Lajittelu, karkea murskaus, metallien magneettinen erottelu, liiman ja sementin irrotus vasaramurskaimella, seulonta, murskeen hauraaksi jähdyttäminen nestetypellä, hienojauhatus, tärinäerottelu, homogenisointi ja annostelu säkkeihin
 - **Vinyloop prosessi:** Liukoisuusominaisuuksiin perustuva. Käsittelyprosessi. Jätteraaka-aineeksi kelpaavat kaapelit, kattomateriaalit, lattiamatot, ikkunat, kalvot ja polymeerijäte. Italian Ferrarassa sijaitseva tehdas on ollut toiminnassa vuodesta 2002
 - **Texyloop –prosessi:** Perustuu Vinyloop -prosessiin. Tarkoitettu erityisesti PVC -pinnoitettujen polyesterikankaiden kierrätykseen.
 - **Yhdyskuntajätteen polttolaitos:** MVR Hamburg MVR Müllverwertung Rudenberg Damm GmbH & Co. KG. Jäte hyödynnetään energiana. Rakennettu kestävämpään tavallista suurempi HCl -pitoisuus savukaasuissa. PVC-jätettä voidaan lisätä yhdyskuntajätteeseen 2 % ilman ongelmia. HCl otetaan savukaasusta talteen kaksivaiheisella happopesuprosessilla. Muita sivutuotteita metallit, kipsi ja pohjatuikka savukaasun puhdistuksesta, jotka kyetään hyödyntämään.
 - **Dow/BSL –Kiertouunipolttolaitos.** Saksa (Schokopa). Käsittelään klooripitoista (PVC-pitoisuus noin 30 %) jätettä. Syötteeksi kelpaa sekä kova että pehmitetty PVC. Prosessivaiheet ovat esikäsittely, poltto rumpu-uunissa, jälkipolttolaitos 1100 °C-asteessa, energian talteenotto höyrystä, savukaasujen jähdytys ja puhdistus vedellä. Korkealaatuinen HCl otetaan talteen märkäpesurilla. Jätteestä peritään korkeahkoa vastaanottomaksua, koska esikäsittely- ja logistiikkakustannukset ovat suuret



bey⁰nd

the obvious

Kirsikka Kiviranta
Kirsikka.kiviranta@vtt.fi

Juha Hakala
Juha.hakala@vtt.fi