

Muovien kiertotalouden ja kierrätysmuovin paloturvallisuus

Tiivistelmä

Kierrätysmuovijalostamoiden ja jätekeskusten paloturvallisuutta ei ole Suomessa viime vuosina laajalti tutkittu, vaikka kierrätys on voimakkaasti lisääntynyt ja kierrätys- ja jäteasemiin liittyviä merkittäviä paloriskejä on tunnistettu. VTT:n tutkimusprojektissa on tehty kirjallisuuskatsaus muovien kierrätykseen liittyvistä paloturvallisuusriskeistä. Tutkimus tukee muovien kiertotalouden kehitystyötä ja siten edistää muovien käytön kestävästä kehitystä ja luonnonvarojen riittävyyttä.

JOHDANTO

Muovien kierrätys on monivaiheinen prosessi, joka sisältää muovijätteen keräämisen, kuljetuksen, varastoinnin, lajittelun ja prosessoinnin kierrätetyksi muoviraaka-aineeksi ja uusien tuotteiden valmistamisen tästä raaka-aineesta. Suomessa ja muissa EU-maissa kierrätetään eniten pakkausmuovijätettä, ja seuraavaksi eniten maatalous- ja rakennusmuovijätettä. Kierrätettyä muovia käytetään pakkausissa, maataloudessa, maa- ja vesirakentamisessa, muussa rakentamisessa ja teollisuudessa sekä kulutustavaroissa [1]. Toistaiseksi myös suuret määrät muovijätettä päätyy poltettavaksi. Muovijätteen energian talteenottoa ei kuitenkaan katsota kierrätykseksi [2].

EU:n jätedirektiivi velvoittaa lisäämään merkittävästi yhdyskuntajätteiden ja erityisesti pakkausjätteiden kierrätystä ja Suomen jätelakia ollaankin uudistamassa [3]. Tavoitteena on, että yhdyskuntajätteen kierrätysaste nousee vuoteen 2035 mennessä 65 prosenttiin ja pakkausjätteen 70 prosenttiin. Vaikka Suomen kierrätys- ja jätekeskuksissa on havaittu merkittäviä paloriskejä [4], ei erityisesti muovien kierrätykseen liittyviä paloriskejä ole aiemmin tutkittu Suomessa. Kun otetaan huomioon muovien kiertotalouden nopea kehitys viime vuosina ja yhä kasvavat kierrätysmäärät, on tärkeää, että toimintaan liittyvät paloriskit tunnistetaan ja käsitellään asianmukaisesti.

MUOVIJÄTTEEN KIERRÄTYS SUOMESSA

Pakkausten tuottajavastuu ja sen toteutus

Pakkausten tuottajavastuu perustuu jätelakiin (646/2011) ja valtioneuvoston asetukseen pakkauksista ja pakkausjätteistä (518/2014), ja niitä sovelletaan kaikkiin tuotteiden pakkaajiin ja pakattujen tuotteiden maahantuojiin, joiden liikevaihto on vähintään miljoona euroa. Tuottaja voi täyttää velvoitensa joko liittymällä tuottajaorganisaatioon tai tekemällä hakemuksen Pirkanmaan ELY-keskuksen tuottajarekisteriin. Liittymällä tuottajaorganisaatioon tuottaja siirtää lain velvoitteet tuottajaorganisaatiolle, joka hoitaa vastaanottoverkostoa ja kierrätystä. Suomen Uusiomuovi Oy [5] on tuottajaorganisaatio, joka toteuttaa yli 2500 yrityksen tuottajavastuuta muovipakkausista. Suomen Uusiomuovi Oy:n sopimustermiinaalit, joita on yli 60, vastaanottavat yritysten omassa toiminnassa syntyvää kierrätettävää muovipakkausjätettä.

Suomen Pakkauskierrätys Oy (Rinki) [6] huolehtii, että pakkausten kierrätys on helppoa myös kuluttajille, jotka voivat viedä lajittelemansa pakkaukset Rinki-ekopisteisiin, joita on yli 1850 eri puolilla Suomea. Julkista jätehuoltoa edustaa Suomen Kiertovoima RY (KIVO) [7], jossa on mukana 33 yhdyskuntajätelaitosta. Kaatopaikoista on tullut nykyaikaisia jätteenkäsittelykeskuksia [8], joissa hyödyntämismenetelmiin kuuluvat materiaalin käyttö energian tuottamiseen, sen käyttö toissijaisena raaka-aineena tuotteiden valmistuksessa tai jätealueen rakentamisessa, myynti kuluttajille tai muu kierrätys. Suurin osa kuluttajilta kerätystä pakkausmuovista päätyy kierrätykseen Fortumin Riihimäen muovijalostamolle [9]. Siellä käsitellään paitsi kuluttajamuovipakkaukset myös teollisuusmuoveja. Suomalaisen muovin kierrätyksen erityispiirre on juomapakkausten panttipohjainen palautusjärjestelmä, jota ylläpitää Suomen Palautuspakkaus OY (PALPA) [10]. Pramia Plastic Oy [11] muuttaa käytetyt PET-pullot muoviksi, joka kelpaa jopa elintarvikepakkausiksi.

- Suomen kierrätys- ja käsittelykeskuksissa kierrätettävien materiaalien määristä tai markkinatilanteesta ei löydy systemaattisesti kerättyä julkista tietoa. Airikkalan [8] mukaan jätekeskusten alueilla varastoitavan jätteen määrä on suuri ja yhden jättekasan pinta-ala voi olla tuhansia neliömetrejä. Kuluttajien muovipakkausjätteiden keräysmäärä on kasvanut niin nopeasti, ettei kotimainen kierrätyskapasiteetti ole riittänyt, vaan osa muovipakkausjätteistä on jouduttu viemään ulkomaille kierrätystä varten [12]. Huomattava osa kaupallisista ja teollisista muovipakkausjätteistä on jo aiemmin viety Kiinaan kierrätettäväksi, mutta vuonna 2018 Kiina kielsi muovijätteiden tuonnin ulkomailta, ja on mahdollista, että muovit on sitemmin varastoitu paalattuna odottamaan vaihtoehtoja käsittelyä tai energian talteenottoa [13].

Muovijäteprosessi

Kotitalousmuovipakkausten erilliskeräys alkoi Suomessa vuonna 2016, jolloin kaatopaikkakielto tuli voimaan. Keräysjärjestelmää ei ole tarkoitettu muulle kotitalouksissa syntyvälle muovijätteelle, esimerkiksi astioille tai leluille. Keräysjärjestelmä ei myöskään tue eri muovilaatujen erottelua toisistaan. Teollisuuden muovi-jäte on usein hyvälaatuista ja valmiiksi lajiteltua [2]. Rakentamiseen liittyvän muovijätteen hyödynnettävyyttä sen sijaan rajoittaa usein lajittelun puute, ja purkamiseen liittyvän muovijätteen kierrätykselle ikä saattaa olla ongelma: vuosikymmeniä sitten käytettyjä kemikaaleja ei ehkä enää sallita tai niille on asetettu käyttörajoituksia. Maatalouden muovijätteen hyödynnettävyyttä vähentää sen likaisuus.

Käsittelylaitoksessa muovit erotellaan eri jakeiksi koon, muodon, värin ja laadun perusteella. Muovien tyyppi ja puhtausvaatimukset vaikuttavat prosessiin, ja esimerkiksi yhden muovilaudun muovijäte, kuten maatalouden paalimuovi, voidaan visuaalisen laadunvalvonnan jälkeen ohjata suoraan pesuprosessiin [14].

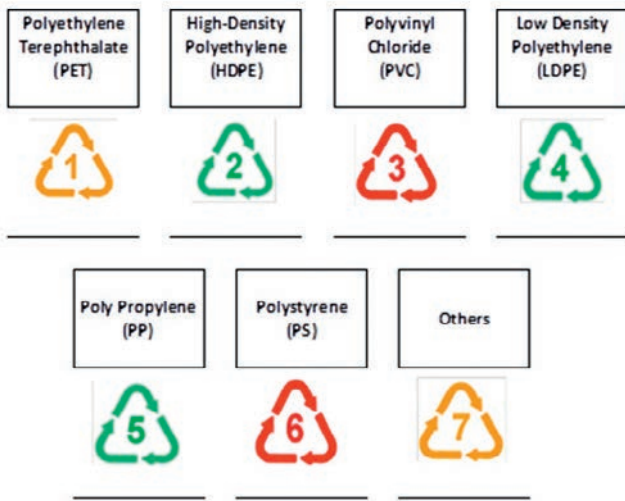
"Muovit hajoavat termisesti eri tavoin, mikä vaikuttaa palon kehitykseen ja hajoamistuotteiden muodostumiseen."

Polttoon päätyvät materiaalit, joita ei voida tunnistaa tai erottaa, monikerrokiset tuotteet, mustat muovituotteet ja esimerkiksi maatalouden muovit, jotka sisältävät paljon orgaanista ainesta. Lajitteluprosessista muovijakeet siirretään kuljettimella suoraan varastohallissa olevaan paalaimen. Paalaamisen avulla pyritään muovijakeiden tehokkaaseen hallintaan sekä varastojen roskaantumisen ja likaantumisen minimointiin [2].

Muoviin jääneet epäpuhtaudet heikentävät kierrätetyn muovin ulkonäköä sekä fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia, ja siksi pesemisellä on merkittävä vaikutus kierrätetyn muovin laatuun [15]. Muovipaalit avataan ennen pesua ja suuremmat kappaleet murskataan pienemmiksi paloiksi. Murskattu muovifraktio pestään monivaiheisessa prosessissa. Samalla muovista poistetaan epäpuhtaudet, kuten maa, kivet, lasi, metalli, orgaaninen aines ja vieraat esineet. Erotus voidaan tehdä mekaanisesti tai manuaalisesti, ja esimerkiksi metallien poistamiseen käytetään magneetteja [16]. Pesty ja kuivattu muovi voidaan tarvittaessa käsitellä edelleen. Rakeet tai pelletit valmistetaan suulakepuristamalla, jolloin muovi kuumennetaan pehmeäksi ja puristetaan suuttimen lä-

<i>Muovityyppi</i>	<i>Käyttö (esimerkkejä)</i>	<i>Vaikutukset ihmisiin ja ympäristöön</i>
Polyeteenitereftalaatti (PET)	Vesipullot, virvoitusjuomapullot, ruokaöljypullot	Myrkyllinen kemiallinen antimoni, joka voi aiheuttaa terveyshaittoja, kuten syöpää
Korkeatiheyksinen polyetyleni (HDPE)	Muovipöydät ja -tuolit, kannut, shampoopullot	Vapauttaa hiilidioksidia, hiilimonoksidia, typpioksidia, hiukkasia ja rikkioksidia
Polyvinyylilokloridi (PVC)	Suihkuverhot, putket, kuplamuovit, ruokapakkaukset	Vapauttaa klorideja, jotka sisältävät dioksiineja tai myrkyllistä kloorivetykaasua
Matalatiheyksinen polyetyleni (LDPE)	Muovikassit, puristettavat pullot	Liian suuri altistuminen säteilylle voi vapauttaa siitä metaania ja eteeniä
Polyproeeni (PP)	Jogurttipurkit, muovikupit, muoviköydet	UV-hajoaminen, erittäin herkkä happatumiselle
Polystyreeni (PS)	Kertakäyttöiset ruokailuvälineet, CD/DVD-kotelot, pukukorit	Vapauttaa kloorifluorihilivetyjä, hiilimonoksidia
Muut muovit	Tuttipullot, CD-levyt, lääkepakkaukset, biomuovit	Päästää myrkyllisiä kaasuja, jotka voivat aiheuttaa varhaisen murrosiän ja liikalihavuuden

Taulukko 1. Muovityypit, niiden käyttökohteet ja vaikutukset ihmisiin ja ympäristöön [17].



Kuva 1. Muovityyppien symbolit ja värikoodit (vihreä=turvallinen käyttää, oranssi=käytettävä varoen, punainen=vältettävä käyttöä) [18].

pi haluttuun muotoon. Joissakin tapauksissa rakeet voidaan edelleen prosessoida muovijauheeksi.

MUOVIJÄTE JA KIERRÄTYSMUOVI

Muovityypit

Kemiallisen koostumuksen ja rakenteen perusteella muovityypit voidaan jaotella taulukossa 1 esitettyihin luokkiin. Taulukossa on kuvattu myös eri muovityyppien käyttökohteet sekä vaikutukset ihmisiin ja ympäristöön. Muovityypit voidaan eritellä myös värikoodilla ja symboleilla kuvan 1 mukaisesti. Suomessa kaikki muovit soveltuvat kierrätykseen, lukuun ottamatta PVC:tä [5].

Muovit hajoavat termisesti eri tavoin, mikä vaikuttaa palon kehitykseen ja hajoamistuotteiden muodostumiseen [19]. Polyeteenitereftalaatin (PET) lämpöhajoaminen tuottaa kevyitä herkästi haihtuvia ja helposti syttyviä kaasuja, jotka ruokkivat liekkiä ja muodostavat rajoitetusti hiiltä. Korkea- ja matalatiheyksisen polyetyleenin (HDPE ja LDPE) lämpöhajoaminen tuottaa osittain hapettettuja tuotteita, kuten aldehydit ja ketonit sekä palamistuotteita, kuten hiilimonoksidi, hiilidioksidi, vesi jne.. Polyvinyylikloridissa (PVC) on tyypillisesti pehmittimenä noin 30 % helposti syttyvää orgaanista nestettä. Kloori vapautuu vetykloridina (HCl) korkeassa lämpötilassa. Tavallinen täyteaine, kalsiumkarbonaatti, reagoi HCl:n kanssa ja tuottaa kalsiumkloridia sekä hiilidioksidipäästöjä. Palotilanteesta riippuen peräti 20 % kloorista voi olla orgaanisessa muodossa. PVC:llä on kuitenkin alhainen palamislämpö ja lämmöntuotto. Lämpöolosuhteista riippuen jäännökseksi muodostuu hiili- tai nokihiukkasia. Polypropeenin (PP) on herkkä jopa pienelle (alle 1 %) happipitoisuudelle, mikä voi aiheuttaa haihtuvien aineiden nopean vapautumisen, joka voi ruokkia tulta. Polystyreeni (PS) on luonteeltaan amorfista ja hajoaa termisesti yhdessä vaiheessa, mikä johtaa molekyylipainon nopeaan alenemiseen. Hapella on erittäin tärkeä rooli polystyreenin hajoamisessa, joka tuottaa bentsaldehydiä, bentsoehappoa, fenolia ja bentsyylialkoholia. Kuten edellä esitetystä nähdään, eri muovien palokäytätyminen voi olla hyvin erilaista.

Epäpuhtaudet ja lisäaineet

Muoveista löytyy lisäaineita ja epäpuhtauksia riippuen muovityypistä, käyttökohteesta, valmistustavasta ja siitä, onko muovi valmistettu neitseellisestä materiaalista vai jätemuovista. Lisäaineet,

jotka on lisätty alkuperäiseen muovimateriaaliin, mutta joista ei ole hyötyä kierrätetyssä muovissa, voidaan myös nähdä epäpuhtauksina [20]. Lisäaineita käytetään erilaisiin tarkoituksiin, kuten polymerointinopeuden tai muovien mekaanisten ominaisuuksien muuttamiseen. Lisäaineita ovat esim. katalyytit, täyteaineet, pehmittimet, stabilointiaineet, väriaineet, voiteluaineet, palonsuoja-aineet jne. Katalyyteillä pyritään nopeaan ja täydelliseen polymerointiin; esimerkiksi Ziegler-Natta-katalyytit ovat yleisiä muun muassa polyeteenin ja polypropeenin valmistuksessa. Täyteaineet ovat inerttejä materiaaleja, jotka antavat muoville lujuutta, kovuutta ja muita ominaisuuksia; esimerkiksi kalsiumkarbonaatti, talkki, piidioksidi, savi ja alumiinioksiditrihydraatti ovat yleisesti käytettyjä täyteaineita. Pehmittimiä lisätään muovien plastiisuuden ja pehmeuden parantamiseksi; esim. kamferia, triasetiinia ja tributyylifosfaattia käytetään yleisesti pehmittiminä. Stabilisaattorit pidentävät muovien käyttöikää tukahduttamalla UV-valon, hapettumisen ja muiden ilmiöiden aiheuttaman hajoamisen; esim. trisfosfiitti on laajalti käytetty stabilointiaine. Muoveihin lisätään myös väriaineita ja pigmenttejä; esimerkiksi sinkkioksidi on yleisesti käytetty väriaine. Voiteluaineita levitetään muottien pinnalle, jotta muovituotteet eivät tartu muotteihin; esimerkiksi grafiitti, parafiini ja vaha ovat yleisesti käytettyjä voiteluaineita. Palonsuoja-aineita lisätään palon leviämismekanismien, kuten H⁺, OH⁻, ym. poistamiseksi; esimerkiksi bromattuja (BRF) ja muita orgaanisia halogeeniyhdisteitä käytetään yleisesti palonsuoja-aineina. Lisää esimerkkejä erityyppisistä lisäaineista löytyy lähteessä [21] olevasta taulukosta. Huomionarvoista on, että koska eri lisäaineilla on erilaiset kemialliset koostumukset, ne muuttavat eri tavoin muovin palamistapaa ja sen paloon liittyviä ominaisuuksia.

Epäpuhtauksien vaikutuksesta muovien palo-ominaisuuksiin löytyy hyvin vähän tietoa. Muutamassa julkaisussa käsitellään kahden hyvin yleisesti käytettyä muovia, PE:tä ja PP:tä. Sekalaista muovijätettä lajiteltaessa ei useinkaan ole mahdollista saada kaikkia epäpuhtauksia poistettua, joten esim. kiviä, erilaista muovityyppiä tai -laatua, kumia, hiekkaa, paperia sekä maalien ja päällysteiden jäännöksiä voi jäädä tarkasteltavaan muovihartsiin [20]. Tyypillisesti kierrätettyä muovia pidetään muoviseoksena, koska usein on mahdotonta kokonaan erottaa yhtä muovityyppiä toisesta kierrätysprosessin aikana muiden ei-muovisten epäpuhtauksien lisäksi. Esimerkiksi erä hollantilaista kierrätettyä PE:tä koostui 91 % PE:stä, 8 % PP:stä, 0,4 % mustista muoveista, 0,3 % PVC:stä, 0,2 % PS:stä, 0,2 % PET:stä ja 0,1 % paperista [22]. Kaksi pääpolymeeria (esimerkiksi PE PP:ssä tai PP PE:ssä epäpuhtautena) voi muodostaa sekoittumattoman seoksen. Tyypillisesti seosmorfologia määräytyy polymeerin pitoisuuden, kahden polymeerin sekoittuvuuden ja yhteensopivuuden sekä prosessimuuttujien, kuten lämpötilan ja leikkausvoimien, perusteella, jotka puolestaan määräävät toisen sekoittumattoman polymeerin leviämisen pääpolymeerin matriisiin. Tämä seosmorfologia puolestaan määrittää materiaalin ominaisuudet, joista jotkut liittyvät voimakkaasti kierrätettyjen muovien molekyyliarkkitehtuuriin. Se voi myös vaikuttaa sulamiseen liittyviin ominaisuuksiin ja viskositeettiin, joilla voi olla merkitystä palon leviämisessä sulamisen yhteydessä, sekä muihin mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten vetolujuus, iskunkestävyys jne. [22, 23]. Edellä esitetystä voidaan päätellä, että myös epäpuhtaudet voivat muuttaa muovin palamistapaa ja palo-ominaisuuksia.

Palo-ominaisuudet

Kierrätettävien muovien palo-ominaisuuksien arviointi on haastavaa, koska kerätyt muovit voivat käsittää vain yhtä muovityyppiä tai useita muovityyppejä, jotka voivat olla joko neitsytmuovia tai kierrätettyä muovia. Yhden tyyppisestä muovista koostuvan massan voidaan olettaa olevan melko homogeenista, jolloin sille voi

- ▶ daan kokeellisesti määritellä keskimääräinen paloteho. Useimmiten kierrätettävä muovi koostuu kuitenkin useista muovityypeistä, jolloin sen keskimääräisiin palo-ominaisuuksiin vaikuttaa kemiallisen koostumuksen lisäksi myös yksittäisten muovien massaprosentti. Erilaisten muovityyppien kulutus voi vaihdella alueellisesti riippuen mm. kuluttajien sosioekonomisesta asemasta, mikä vaikuttaa kierrätykseen kerättyjen yksittäisten muovien massaprosentteihin. Kierrätysyritysten keräämät tiedot eri muovityyppien määristä olisivat hyvä lähtökohta arvioitaessa yksittäisten muovien keskimääräistä massaprosenttia eri alueilla. Jos tällaisia tietoja ei ole saatavilla, pitäisi ottaa riittävä määrä näytteitä, jotka edustavat riittävä määrä erilaisia muovijäteseoksia, jotka sitten voitaisiin testata niiden palo-ominaisuuksien määrittämiseksi. Näitä arvioituja palo-ominaisuuksia voitaisiin sitten käyttää paloturvallisuuden jatkok tutkimuksiin. Palo-ominaisuuksien huomioon ottamiseksi ainakin syttyvyys, liekinleviämisenopeus, lämmön- ja savuntuotto, sammutettavuus, ja sammutusvesien myrkyllisyys olisi arvioitava kunkin muovityypin tai muoviseoksen osalta (Kuva 2) [19]. Em. tietojen heikko saatavuus tulisi ottaa huomioon tulevaisuuden tutkimustyötä suunniteltaessa. Seuraavassa kappaleessa on yhteenveto asioista, jotka tulisi vähintään määrittää jätemuovipaloon liittyvien paloturvallisuusriskien huomioon ottamiseksi.

MUOVIN KIERRÄTYKSEN PALOTURVALLISUUSRISKIT

Jätepalot ja palontorjunta

Skandinaviassa on raportoitu monia jätepaloja [24, 25]. Vuonna 2014 Norjassa syttyi tulipalo kasassa sähkö- ja elektroniikkaromua, ja sammutus kesti 36 tuntia. Vuonna 2016 Ruotsissa pieni jätessäiliön tulipalo levisi läheiseen jätäkasaan noin 4000 m²:n alueelle, jolloin sammuttamiseen tarvittiin noin 200 palomiestä, 7000 tonnia hiekkaa ja 1000 tonnia kipsiä. Vuonna 2005 Tanskassa paalaamaton jätepolttoaine syttyi ja tuli levisi paalien varastointialueelle. Vesi ei tunkeutunut paaleihin ja puolen tunnin kuluttua palomiehet luovuttivat, koska lämpötila nousi niin korkeaksi, että vesi höyrystyi, mikä teki tehokkaan sammutustoiminnan mahdottomaksi. Lopulta tulen peittämiseen käytettiin hiekkaa. Vuonna 2020 Suomessa (Tampereella) paloi epäpuhdasta metalliromua sisältänyt rakennusjätäkasa [26], josta vapautui myrkyllisiä savukaasuja. Paikalle hälytettiin noin kymmenen palontorjuntayksikköä ja palanutta kasaa vartioitiin useita päiviä. Ympäröivältä alueelta evakuoitiin noin 350 ihmistä. Vuonna 2015 Isossa-Britanniasa (Hanbury) jätteet syttyivät muovien kierrätyslaitoksessa [27], ja paikallisia kehoitettiin sulkemaan ovet ja ikkunat, koska savu haisi voimakkaasti muoville. Vuonna 2013 Intiassa Brahmapuramin kiinteiden jätteiden käsittelylaitoksessa tapahtui muovijäte-

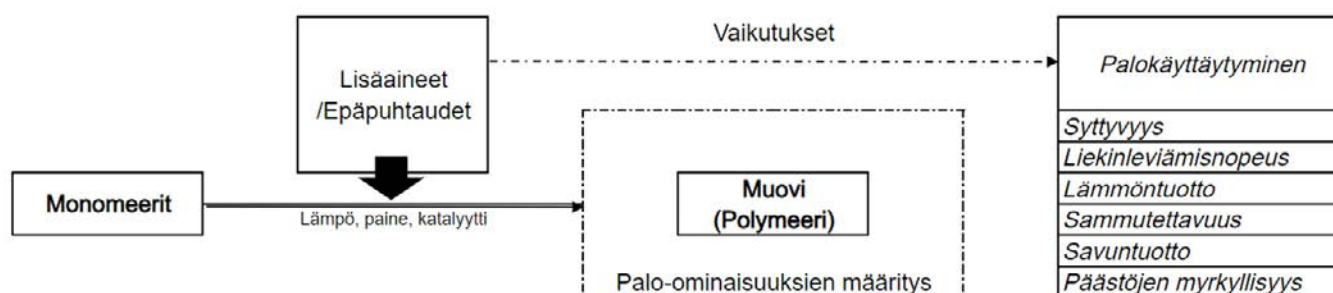
"Palontorjuntaan tarvitaan suuria sammutusresursseja pitkäksi aikaa, palotuotteet ovat myrkyllisiä ja savu heikentää voimakkaasti näkyvyyttä."

palo [28], jonka sammuttamiseen ja vartiointiin osallistui 30 palomiestä. Palontorjunnan kerrottiin olleen vaikeaa, koska paksu savu häikäisi näkyvyyttä ja tapahtui uudelleensyttyminen. Vuonna 2017 muovin kierrätyslaitos UK:ssa (Blackburn) syttyi tuleen [29]. Ihmiset evakuoitiin ja ovet ja ikkunat kehoitettiin pitämään kiinni. Savun katsottiin olevan luonteeltaan myrkyllistä ja syövyttävää, ja valunut vesi saattoi saastuttaa vesimuodostumia.

Edellä kuvatun perusteella jätepaloja on yleensä vaikea hallita, koska ne ovat erittäin suuria, tuottavat paljon lämpöä ja savua ja sammutusvettä on vaikea saada tunkeutumaan tulipesäkkeeseen. Palontorjuntaan tarvitaan suuria sammutusresursseja pitkäksi aikaa, palotuotteet ovat myrkyllisiä ja savu heikentää voimakkaasti näkyvyyttä. Uudelleen syttyminen on myös tyypillistä, jolloin palontorjunta on aloitettava uudelleen. Toisinaan ympäröivän alueen ihmisiä joudutaan evakuoimaan ympäristöön leviävien savukaasujen vuoksi. Lisäksi sammutusvesi voi saastuttaa vesimuodostumia. Ottaen huomioon jätepalojen hallintaan liittyvät suuret haasteet, tulisi niiden torjunnan suunnitteluun ja sopivan lähestymistavan valintaan kiinnittää erityistä huomiota. Taulukossa 2 esitetään Norjan, Ruotsin ja Suomen jätepaloja koskevia tietoja vuosilta 2016–2018 [24, 25, 30]. Voidaan todeta, että jätepalojen torjunnan vaikeuden vuoksi 38 tulipalotapahtumaa, joihin liittyy yli 15 m³ materiaalia, on Suomessa huomattava määrä tapahtumia vuodessa.

Palon luonne ja haasteet

Yleensä jätökasan paloilmiot luokitellaan ”sisältä-ulos” ja ”ulkoasisään” -palomiseksi, koska lämpötilan kehitys tapausten välillä on hyvin erilainen. Kun palo alkaa sisältä (itsestään lämpenevä, litiumakku), sen kehittyminen ja näkyminen vie aikaa, palo ehtii kehittyä pahaksi, palopesäketä on vaikea löytää ja siihen on vai-



Kuva 2. Muovin keskeisten palo-ominaisuuksien arviointi (viitteen [27] mukaan).

Lähde	Norja	Ruotsi	Suomi	Huomiot
[32]	141 hälytystä jätekeskuksista vuosina 2016–18			
[32]		Noin 60 raportoitua paloa vuodessa jätekeskuksissa vuosina 2016–18		
[33]		Ruotsin pelastuslaitos raportoi vuodessa 70–80 kaatopaikkapaloa, joiden koko on 500–2000 m ²		
[38]			390 paloa vuonna 2017	Jäte- tai kierrätysmateriaalia alle 15 m ³ .
			38 paloa vuonna 2017	Jäte- tai kierrätysmateriaalia yli 15 m ³ .

Taulukko 2. Jätepalotiedot (Norja, Ruotsi ja Suomi).

kea saada vettä, mikä vaikeuttaa sammuttamista. Tilanne on toinen, kun palo alkaa ulkopinnalta, ja hiiltyminen voi estää palon jatkumisen. Palopesäkkeet on tällaisessa tulipalossa helppo paikallistaa verrattuna sisältä-ulos-paloon. Muutamissa kokeissa on havaittu, että muovipalo tuottaa hyvin korkeita lämpötiloja. WISH-foorumien raportissa [31] kuvatuissa kokeissa muovikasan palo aiheutti yli 1200 °C:n lämpötilan, kun muiden jätekasojen paloissa lämpötila jäi 950 °C:een. Muovipalon korkea lämpötila on mainittu myös muissa lähteissä [32, 33]. Korkea lämpötila voi aiheuttaa haihtuvien yhdisteiden hajoamisen, jolloin syntyy tiheää mustaa savua. Johtuen erittäin korkeista lämpötiloista ja tiheän savun päästöistä muovijätepalon torjunnan voidaan todeta olevan vielä vaikeampaa kuin muiden jätteiden palon, ja muovijätteen paloa voidaan pitää suurena paloriskinä [32].

Muovijätepaloon liittyvät riskit tulisi ottaa huomioon esim. rajoittamalla muovijätevarastojen kokoa ja pitämällä ne erillään toisistaan, mikä rajoittaisi palon leviämistä varastosta toiseen. Palon leviäminen voi tapahtua joko säteilylämmön vaikutuksesta tai sulan muovin virtauksen välityksellä. Sprinklereiden sammutustehokkuus on kyseenalaista, koska veden pääsy palopesäkkeeseen on epävarmaa, mutta ne voivat kuitenkin jäähdyttää viereisiä varastoja ja vähentää niiden syttymisen mahdollisuutta. Saastuneen veden valuminen ympäristöön tulisi estää. Tiheän ja myrkyllisen savun muodostumisen mahdollisuus aiheuttaa haasteita sekä sisä- että ulko-varastointiin. Sisätiloissa on oltava asianmukainen savun- ja lämmönhallintajärjestelmä, jotta turvallinen evakuointi ja palontorjunta ovat mahdollisia. Ulkona tuuliolosuhteet voivat vaikeuttaa palontorjuntaa ja edellyttää ihmisten evakuoinnin lähialueelta. Kaikki edellä mainitut huolenaiheet tulee palotutkimuksessa ottaa huomioon, ja ainakin seuraavat asiat olisi tehtävä, määritettävä tai tutkittava:

- Arvio muovijätteen lämpöarvosta (MJ/kg)
- Arvio palamisnopeudesta (kg/s)
- Syttymisen ja liekin leviämisen riski
- Palamistuotteet: CO, noki, muut myrkylliset päästöt
- Muut termisen ominaisuudet: lämmönjohtavuus, ominaislämpö, tiheys jne.
- Tärkeimpänä: Paloteho eli lämmönvapautumisnopeus ajan suhteen

Tavoitteesta riippuen testejä voitaisiin tehdä pienessä tai keski-suudessa mittakaavassa. Tällä perusteella voitaisiin tehdä palosimulointeja jätemuovivarastojen erilaisten järjestelyjen ja tulipalon vaikutusten tutkimiseksi sisä- tai ulkotiloissa tuulen vaikutukset huomioiden.

YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kierrätettävien muovien palo-ominaisuuksien arviointi on haastavaa, koska kerätyt muovit voivat käsittää monia muovityyppejä, jotka hajoavat termisesti eri tavoin, mikä vaikuttaa palon kehitykseen ja hajoamistuotteiden muodostumiseen. Lisäksi muoveista löytyy lisäaineita ja epäpuhtauksia, jotka myös vaikuttavat ominaisuuksiin. Kuitenkin olisi tärkeää kiinnittää erityistä huomiota jätemuovivarastojen suunnitteluun ja niihin liittyvien paloriskien ehkäisyyn, sekä sammutusmenetelmien suunnitteluun ja kehittämiseen. Muovijätteen paloa voidaan pitää suurena paloriskinä.

LÄHDELUETTELO

1. Eskelinen, H., Haavisto, T., Salmenperä, H. & Dahlbo, H. Muovien kierrätyksen tilanne ja haasteet. CLIC Innovation OY. Raportti nro D4.1-3. Helsinki 2016. 58 s. ISBN 978-952-5947-90-8.
2. Salminen, J., Turunen, T. & Fjäder, P. Muistio kansallisten EoW-menettelyiden mahdollisuuksista mekaanisen muovinkierrätyksen edistämiseksi. Ympäristöministeriö, 12.6.2020. 17 s.
3. Ympäristöministeriö. Jätelain uudistus etenee – erilliskeräyksen laajeneminen vauhdittaa kiertotaloutta. Ympäristöministeriön tiedote 30.11.2020. 1 s.
4. Rinne, T., Hykkyrä, H., Tillander, K., Jantti, J., Väisänen, T., Yli-Pirilä, P., Nuutinen, I. & Ruuskanen, J. Jätekeskusten paloturvallisuus – Riskit ympäristölle tulipalotilanteessa. Espoo 2008. VTT Tiedotteita – Research Notes 2457. 125 s. + liitt. 39 s. ISBN 978-951-38-7250-2.
5. Suomen Uusiomuovi Oy. <http://www.uusiomuovi.fi/> [Luettu 16.2.2021]
6. Suomen Pakkauskierrätys RINKI Oy. <https://rinkiin.fi/> [Luettu 22.2.2021]
7. Suomen Kiertovoima RY. <https://kivo.fi/> [Luettu 22.2.2021] ▶

- 8. Airikkala, M. Development of Fire Safety in Landfill Sites, Case Jätekuukko Ltd. (Jätekeskusten paloturvallisuus – Case Jätekuukko Oy), SAVONIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES. 2019.
9. Fortum. <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisoille/kierratys-ja-jatepalvelut/fortum-recyclingwaste/riihimaanen-laitosalue> [Luettu 22.2.2021]
10. Suomen palautuspakkaus OY. <https://www.palpa.fi/> [Luettu 22.2.2021]
11. Pramia Plastic Oy. <https://www.pramiaplastic.fi/> [Luettu 16.2.2021]
12. Uusiouutiset. Muovipakkausjätettä joudutaan viemään ulkomaille kierrätettäväksi. 1.3.2020. <https://www.uusiouutiset.fi/muovipakkausjätettä-joudutaan-viemaan-ulkomaille-kierratettäväksi/> [Luettu 23.4.2021]
13. Laine-Ylijoki, J., zu Castell-Rüdenhausen, M., Kaartinen, T., Kärki, J., Pellikka, T., Punkkinen, H., Saastamoinen, H., Wahlström, M. & Pohjakallio, M. Selvitys eräiden jätteiden ja rejektien käsittelykapasiteetin sekä muutaman jäteperäisen materiaalin markkinan tilanteesta Suomessa, Ympäristöministeriön raportteja 21/2018. ISBN: 978-952-11-4812-5 (PDF)
14. Merta, E., Mroueh, U-M., Meinander, M., Punkkinen, H., Vähä-Nissi, M., & Kortet, S. (2012). Muovipakkausten kierrätyksen edistäminen Suomessa. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Tutkimusraportti No. VTT-R-01728-12 http://www.tem.fi/files/32830/11_2012_muovipakkauksen_kierrätyksen_edistaminen_suomessa.pdf
15. Mancini, S. D., Schwartzman, J. A. S., Nogueira, A. R., Kago-hara, D. A. & Za-nin, M. Additional steps in mechanical recycling of PET. *Journal of Cleaner Production* 18: 92–100. 2010.
16. Harper, C. *Handbook of Plastics Technologies: The complete guide to properties and performance*, New York 2006, McGraw-Hill. ISBN: 9780071460682.
17. Nxumalo, S. M., Mabaso, S. D., Mamba, S. F. & Singwane, S. S. Plastic waste management practices in the rural areas of Eswatini, Elsevier, *Social Sciences & Humanities Open* 2, 2020.
18. Foster, S. WRAP. Domestic Mixed Plastics Packaging Waste Options. Final Project Report. June 2008. ISBN: 1-84405-396-2.
19. Witkowski A., Stec A. & Hull T. A. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Thermal Decomposition of Polymeric Materials*, 5th Ed., Springer, 2016, pp. 167–254.
20. Stenmarck, A., Belleza, E. L., Fråne, A., Busch, N., Larsen, A. & Wahlström, M. Hazardous substances in plastics – ways to increase recycling, IVL Swedish Environmental Research Institute, Report number C 233, 2017.
21. Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E. & Purnella, P. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling, Elsevier, *Journal of Hazardous Materials* 344, 2018, pp. 179–199.
22. Chacon, F. A., Brouwer, M. T., Thoden van Velzen, E. U. & Smeding, I. W. A first assessment of the impact of impurities in PP and PE recycled plastics, Wageningen University & Research: Wageningen Food & Biobased Research, Public Report 2030, 2020.
23. Thoden van Velzen, E. U., Chu, S., C F. A., Brouwer, M. T. & Molenveld, K. The impact of impurities on the mechanical properties of recycled polyethylene, Wiley, *Packaging Technology and Science*, 2020, DOI: 10.1002/pts.2551.
24. Mikalsen, R. F., Lönnermark, A., Glansberg, K., McNamee, M. & Storesund, K. Fires in waste facilities: Challenges and solutions from a Scandinavian perspective, *Fire Safety Journal*, Volume 120, 2021.
25. Stenis, J. & Hogland W. Fire in waste-fuel stores: risk management and estimation of real cost, *Springer, Mater Cycles Waste Manag* 13, 2011, pp. 247–258
26. https://yle.fi/uutiset/osasto/news/tampere_evacuates_350_residents_over_hazardous_waste_fire/11345970 [Luettu 12.01.2021]
27. <https://www.bbc.com/news/uk-england-stoke-staffordshire-38878262> [Luettu 12.01.2021]
28. <https://www.thehindu.com/news/cities/Kochi/plastic-waste-catches-fire-at-brahmapuram/article4419738.ece> [Luettu 12.01.2021]
29. <https://news.sky.com/story/fire-at-recycling-plant-in-blackburn-engulfs-100-tons-of-plastic-10999166> [Luettu 12.01.2021]
30. Ketola, J. & Kokki, E. Finnish Rescue Services' Pocket Statistics 2013–2017, Emergency Services College Publication, D-series: Other 3, 2018.
31. Waste Industry Safety And Health Forum (WISH) Report: Reducing Fire Risk at Waste Management Sites, 2017.
32. Fire safety in waste facilities, Fire and Rescue NSW, Community Safety Directorate, Fire Safety Branch, D17/81582, 2020.
33. LANDFILL FIRES THEIR MAGNITUDE, CHARACTERISTICS, AND MITIGATION, Federal Emergency Management Agency, United States, Fire Administration National Fire Data Center, TriData Corporation, FA-225, 2002.

