



Muovipoli Oy

Muovialan resurssitehokkuutta tukevat palvelut

Raportti 30.6.2014



PÄIJÄT-HÄMEEN LIITTO

Tämä raportti on tuotettu projektissa “Muovialan resurssitehokkuutta tukevat palvelut”. Projekti oli osarahoitettu Euroopan aluekehitysrahastosta Päijät-Hämeen liiton kautta Etelä-Suomen EAKR-ohjelmasta toimintalinjalta 5: Suuralueiden temaattinen kehittäminen. Muita rahoittajia olivat Nastolan kunta, Lahden kaupunki ja Muovipoli Oy. Hankkeen toteutusaika oli 1.1.-31.10.2014. Hankkeen projektikoodi on A32352.

Selvityksen laatimiseen osallistui Muovipoli Oy:n lisäksi Tampereen teknillisen yliopiston Materiaaliopin laitos.

Sisällys

Sisällys	2
1 Johdanto	3
2 Materiaalitehokkuus.....	5
2.1 Ohjaavat tekijät	6
2.2 Keinoja materiaalitehokkuuden parantamiseen	9
2.3 Työntekijöiden osaaminen ja resurssitehokkuus	12
3 Muoviteollisuuden materiaalitehokkuus	14
3.1 Materiaalien valinta ja materiaalmäärän rajausta	15
3.2 Kierrätys ja uusiokäyttö.....	16
3.2.1 Muovien kierrätysmenetelmät	18
3.2.2 Muovin kierrätyksen haasteet.....	18
3.2.3 Muovin kierrätysasteen parantaminen ja jätteiden hyödyntäminen	20
4 Energiatehokkuus	22
4.1 Energian käytön kartoittaminen.....	22
4.2 Energian säästökohteet muoviteollisuudessa	23
5 Materiaalitehokasta toimintaa tukevat palvelut	26
5.1 Yrityksen tai tuotantoyksikön materiaalitehokkuus.....	26
5.1.1 Materiaalikatselmus	27
5.1.2 Tuotannon simulointi ja mallinnus	28
5.1.3 Arvovirtakuvaus (Value Stream Mapping).....	31
5.1.4 Materiaalivirta-analyysit.....	31
5.1.5 Muut työkalut.....	32
5.2 Kierrätys- ja uusointipalvelut	32
5.3 Tuotteet ja komponentit	33
5.3.1 Elinkaaritarkastelut.....	34
5.3.2 Testaus- ja laboratoriopalvelut	34
Lähteet	38

1 Johdanto

Resurssitehokkuudella tarkoitetaan energian, luonnonvarojen ja materiaalien tehokasta käyttöä. Resurssitehokkaalla toiminnalla pyritään säästämään tuotannollisia resursseja ja ympäristöä aikaansaaden samalla kustannussäästöjä sekä kilpailukykyisiä tuotteita ja palveluita. Tyypillisesti resurssitehokkuuteen yhdistetään energia- ja materiaalitehokkuus, jotka pitävät sisällään muun muassa energian säästeliään käytön, tehokkaan sivuvirtojen hallinnan ja materiaalin kierrätyksen tai uusiokäytön. [1] Näiden lisäksi resurssitehokasta toimintaa tukee muun muassa työntekijöiden osaamisen ylläpitäminen ja kehittäminen.

Resurssitehokkuuden yhteydessä voi törmätä teknologiatermiin *cleantech*, joka tarkoittaa kirjaimellisesti ”puhdasta teknologiaa” (*clean technology*). Cleantech pitää sisällään resurssitehokkuuden tehostamisen. Cleantechin tarkoituksena on tuottaa palveluita, prosesseja ja tuotteita siten, että vähennetään negatiivisia ympäristövaikutuksia ja edistetään luonnonvarojen kestäväää käyttöä. Samalla parannetaan teollisuuden ja palveluiden kilpailukykyä materiaalien ja energian tehokkaalla käytöllä. Suomessa Cleantech nähdään merkittävänä tulevaisuuden toimialana, ja se lasketaan jo nyt yhdeksi Suomen elinkeinopolitiikan painopistealueeksi. Suomessa on lukuisia cleantech-yrityksiä, joiden yhteenlaskettu liikevaihto kasvoi vuonna 2012 noin 15 % edelliseen vuoteen nähden, ollen noin 25 miljardia euroa. Suomea pidetäänkin yhtenä maailman johtavista cleantech-maista, jonka vahvuuksia ovat energian, materiaalien ja veden käytön tehokkuus teollisissa prosesseissa sekä bioenergia ja biopohjaiset tuotteet. Hallitus on linjannut cleantech-strategiansa tavoitteeksi vauhdittaa suomalaisen cleantech-liiketoiminnan kasvua ja perinteisen teollisuuden uusiutumista puhtaan teknologian avulla. [2]

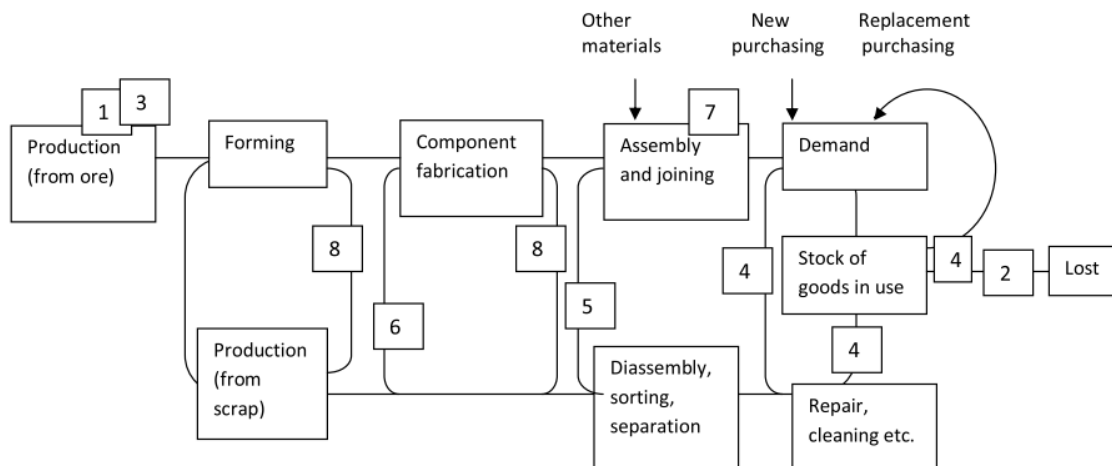
Uusiutumattomien luonnonvarojen hupeneminen ja sitä myötä myös niiden kallistuminen kannustaa hakemaan keinoja resurssien säästämiseksi ja tehostamiseksi. Tämä selvitys keskittyy muoviteollisuuden ja muoveja käyttävän teollisuuden resurssitehokkuuteen. Materiaalitehokkuuden keinot on yleensä liitetty joko tuotantoprosessien tehokkuuden parantamiseen tai niiden tai kuluttajilta tulevan materiaalin kierrätykseen tai hyödyntämiseen. Materiaalitehokkuuden keinoja ovat kuitenkin myös tuotteen käyttöaikaan liittyvät ominaisuudet, kuten tuotteen kesto, monikäyttöisyys tai käytön määrä, tai tuotteen käytön jälkeiset keinot, kuten modulaarisuus, uudelleenkäyttö ja kierrätettävyys. Väestönkasvu ja globaalin elintason nousu ovat nostaneet esiin huolen luonnonvarojen riittävydestä niin yhteiskunnallisessa keskustelussa, politiikassa kuin liike-elämässäkin. Asia on erityisen kiinnostava materiaaleja suuria määriä käyttävän

valmistavan teollisuuden näkökulmasta, sillä kun materiaalien kysyntä kasvaa ja/tai niiden saatavuus heikentyy, toimitusepävarmuus lisääntyy ja niiden hinnat nousevat. Materiaalien tuotannon ja prosessoinnin ympäristövaikutukset nousevat myös kriittisiksi.

2 Materiaalitehokkuus

Materiaalitehokkuus ytimekkäästi määriteltynä tarkoittaa tuotteiden tai palvelun tarjoamista vähemmällä materiaalien tuotannolla ja prosessoinnilla. Allwood *et al.* ovat esittäneet materiaalitehokkuuden ns. “white paper”:ⁿ [3], missä he esittävät eri vaihtoehtoja joiden avulla on mahdollista merkittävästi vähentää kokonaisympäristövaikutuksia globaalissa taloudessa. Tarkastelun painopiste on teknisissä materiaaleissa käyttäen sekä resurssitehokkuuspohjaisia että tuoteperusteisia lähestymistapoja. Materiaalien globaali käyttö on nelinkertaistunut 1960-luvulta, ja kasvaa yhä nopeasti. [3] On arvioitu, että materiaalien kysyntä on vuonna 2050 vähintään kaksinkertaistunut nykyisestä. [4]

Teollisuuden käyttämät materiaalit on usein johdettu/valmistettu biopohjaisista raaka-aineista (esim. puutavara, paperi), malmeista (metallit, keraamit) ja öljystä (polymeerit). Kysymys raaka-aineiden loppumisesta voidaan useimmissa tapauksissa muotoilla muotoihin “milloin ei-uusiutuvien raaka-aineiden (öljy, malmit) hinta alkaa rajoittaa niiden käyttöä”, ja ”millä hyödyntämistavalla uusiutuvien raaka-aineiden käyttö on biologisesti kestävä”. [3] IAE:n mukaan, 56 % teollisista CO₂-päästöistä perustuu viiden materiaalin, teräksen, sementin, muovin, paperin ja alumiinin tuotantoon sekä prosessointiin. Globaaleista CO₂ päästöistä 36 % on peräisin teollisuudesta, joten 20 % kaikista energia- ja prosessiperäisistä päästöistä liittyy materiaaleihin. [4] Allwood *et al.* ovat esittäneet neljä pääkeinoa CO₂-päästöjen vähentämiseen: energiatehokkuuden parantaminen, tuottavuuden parantaminen, kierrätysasteen lisääminen ja globaalin energiantuotantojärjestelmän hiilenpoisto. Kuvassa 1 on esitetty eri strategioita materiaali- ja energiatehokkuuden parantamiseksi. Kuva perustuu metallituotteen elinkaareen, mutta sitä voidaan soveltaa myös muista materiaaleista valmistettuihin tuotteisiin. [3]



Energy and carbon efficiency strategies:

1. Energy efficiency
2. More recycling
3. Carbon capture – process or energy

Material efficiency strategies:

4. Longer life, more use, repair and re-sale
5. Product upgrade, modularity, remanufacturing
6. Component re-use
7. Less metal, same service
8. Yield improvements

Kuva 1. Materiaalitehokkuuden strategiat [3].

Raaka-aineiden tuotannossa tärkeimmät strategiat ovat tuotannon energiatehokkuus ja energiantuotannon hiilen talteenotto. Tuotteiden tai tuoteosien valmistusvaiheessa tuotantoprosessin tehokkuuden parantaminen on keskeistä esimerkiksi hyödyntäen valmistuksessa tuotannon sivuvirtoja. Komponenttien uudelleenkäyttö valmistuksessa on myös mahdollista. Komponenttien kokoamis- ja liittämisvaiheen keinoja ovat modulaarisuus sekä tuotteen päivitys tai uudelleenmuokkaaminen. Tuote voi olla myös mahdollista valmistaa käyttäen vähemmän materiaaleja, heikentämättä kuitenkaan sen tuoteominaisuuksia, toimivuutta tai käytettävyyttä. Tuotteen käyttövaiheen keinoja ovat käyttöajan pidentäminen tai käytön lisääminen, korjaaminen ja tuotteen uudelleen myynti. Jos tuotetta ei voida korjata tai sen komponentteja tai materiaaleja ei voida hyödyntää alkuperäisen tuotteen valmistuksessa, kierrätysasteen nostaminen sen vaatimaa energiankäyttöä lisäämättä voi olla vaihtoehto. [3]

2.1 Ohjaavat tekijät

Materiaali- ja energiatehokkuus liittyvät usein suoraan toisiinsa. Vaikka energiatehokkuuden määritelmät ovat selkeitä verrattuna materiaalitehokkuuteen, monimutkaiset teollisuuden prosessit ja energiavirrat, erilaiset tuotteet ja vaihtelevat tuotantoasteet tekevät energiatehokkuuden määrittämisen ja mittaamisen vaikeammaksi käytännössä. [5] Käytetyimmissä ekotehokkuuden viitekehysissä (World Business Coun-

cil for Sustainable Development (WBCSD) [6] ja Müller and Sturm [7]), yhteiset tekijät sisältävät energiankulutuksen, vedenkulutuksen, kasvihuonekaasupäästöt, otsonikerrosta tuhoavien aineiden päästöt sekä materiaalien kulutuksen tai kokonaisjätteen määrän. [8]

Materiaalitehokkuuden osalta tarkat indikaattorit ja työkalut sen mittaamiseksi ovat vielä puutteelliset. Esimerkiksi energiatehokkuudesta on olemassa horisontaalinen ns. BREF-julkaisu (BREF=Best Available Techniques BAT reference documents) [9], johon pohjautuen on tehty myös kansallinen energiatehokkuuden BAT-julkaisu. [10] Prosessoivassa teollisuudessa materiaalitehokkuutta on usein mitattu vertaamalla tuotantojätteen tai sivuvirtojen määrää kokonaistuotantoon joko arvo- tai painoperusteisesti [11].

Materiaalitehokkuuteen on kuitenkin viitattu useissa EU:n linjauksissa ja direktiiveissä. Jo 2003 komissio julkaisi tuotelähtöistä ympäristöpolitiikkaa koskevan tiedonannon (IPP), mikä painotti elinkaariajattelua, markkinavetoisuutta, eri sidosryhmien sitouttamista, jatkuvaa parantamista ja monipuolisia ohjauskeinoja [12]. EU:n ympäristöteknologiaa koskevat toimintaohjelma (ETAP) julkaistiin vuonna 2004, minkä tavoitteena on teknologian avulla vähentää luonnonvaroihin kohdistuvia paineita. Kestävää luonnonvarojen käyttöä koskeva strategia julkaistiin v. 2005 [13]. EU:n ekologista suunnittelua koskeva direktiivi (EuP) astui voimaan v. 2005 [14]. Siinä asetettiin tietyille energiaa käyttäville tuoteryhmille ympäristöasiat huomioon ottavia suunnitteluvaatimuksia, jotta ne voivat vapaasti liikkua EU:n sisämarkkinoilla. Lisäksi vuonna 2008 EU:n komissio julkaisi kestävää kulutusta, tuotantoa ja teollisuuspolitiikkaa koskevan toimintaohjelman, missä esitettiin toimenpiteitä mm. luonnonvarojen käytön tehokkuuden parantamiseen, eko-innovaatioiden tukemiseen ja ympäristöön liittyvien mahdollisuuksien hyödyntämiseen elinkeinoelämässä [13].

Suomi on ollut kansainvälisessä kehityksessä hyvin mukana. Ohjelma kestävän kulutuksen ja tuotannon edistämiseksi (KULTU) valmistui vuonna 2005 [15]. Myös valtakunnallinen jätehuoltosuunnitelma (VALTSU) pitää sisällään paljon linjauksia materiaalitehokkuuden parantamiseksi [16]. Kansallinen luonnonvarastrategia [17] valmistui 2009 Sitran toimesta. Se asetti neljä strategista tavoitetta: 1. Suomessa on menestyvä korkean arvonlisän biotalous, 2. Suomi hyödyntää ja kierrättää materiaalivirtoja tehokkaasti, 3. Alueelliset voimavarat luovat kansallista lisäarvoa ja paikallista hyvinvointia ja 4. Suomi on aloitteellinen edelläkävijä luonnonvarakysymyksissä. Sen mukaan yhteiskunnan käyttöön ottamat luonnonvarat tulee pitää talousjärjestelmän piirissä mahdollisimman pitkään siten, että ne tuottavat mahdollisimman suuren lisäarvon ja mahdollisimman vähän arvokkaita materiaaleja poistuu lopullisesti talousjärjestelmästä, ja että tuotesuunnittelussa ratkaistaan pitkälti koko elinkaaren aikainen materiaalien käyttö, tuotteiden kestävyys ja kierrätysmahdollisuudet. [17]

Strategiassa esitellään myös 18 selvää muutosaskelta liittyen muun muassa bio-osaamiseen ja bio-liiketoimintaan, materiaalikiertojen hallintaan sekä alueellisiin strategioihin. Muutosaskelissa tuodaan esille myös vahvasti tuotelähtöinen resurssitehokkuus, jonka kehittämiseksi ehdotetaan tuotelähtöisen ympäristöjohtamisen kansallisen osaamisverkoston perustamista. Sen avulla tuettaisiin ympäristömyötäisen tuotesuunnittelun (DfE) integroimista yritysten johtamisjärjestelmiin sekä edistettäisiin EU:n tuotelähtöisen ympäristöpolitiikan (IPP) jalkauttamista. Lisäksi ehdotetaan, että luodaan ja otetaan käyttöön ainevirtoihin ja elinkaaritarkasteluun pohjautuvia tuotemerkintöjä, jotka soveltuisivat sekä materiaali- että energia-ratkaisujen arviointiin. [17]

Kansallisen luonnonvarastrategian taustaraportissa tuodaan vahvasti esille materiaalitehokkuuden merkityksen kasvu; materiaalitehokkuuden edistäminen tuotteen elinkaaritarkastelun avulla aina raaka-ainelähteiltä jalostuksen ja valmistuksen kautta kulutukseen sekä käytön jälkeen tapahtuvaan hyötykäyttöön ja lopulliseen hylkäämiseen saakka katsotaan tärkeäksi. Siinä myös korostetaan, että tulevaisuudessa raaka-aineiden kysynnän kasvu ja uusiutumattomien luonnonvarojen ehtyminen samoin kuin kohoavat jäte- ja kemikaalikustannukset tekevät materiaalitehokkuuden tavoittelusta entistäkin kannattavampaa. Materiaalien käyttö voi muodostaa suoraan tai välillisesti jopa yli puolet yrityksen muuttuvista kustannuksista, joten yritysten kannattaakin kiinnittää entistä suurempaa huomiota materiaalien käytön ja materiaalivirtojen järjestelmälliseen tehostamiseen. Materiaalitehokkuuden käytännön tehostamistoimet voivat liittyä paitsi raaka-aineiden käyttöön ja tuotantotapojen parantamiseen myös innovaatioiden kehittämiseen koko tuoteketjussa. Yritysten kannattaa hyödyntää tämä säästöpotentiaali esimerkiksi uusien niukka-resurssi-suuteen perustuvien teknologiaratkaisujen ja liiketoimintamallien avulla. Lisäksi raportissa tuodaan esille, että yrityksille koituvien suorien hyötyjen lisäksi materiaalitehokkuuden kehittäminen luo mahdollisuuksia uudenlaiseen palveluliiketoimintaan, joka kehittää materiaalivirtojen kokonaishallintaa. Palvelut voivat liittyä esimerkiksi toimitusketjun tehostamiseen, prosessien ohjaukseen, jätehuoltoon, resurssien hallinnan palveluihin, palveluntarjoajien yhteistyöhön ja ekotehokkuusanalyysiin. [18]

Esiselvitys materiaalitehokkuuden palvelukeskuksen perustamisesta tehtiin ympäristöministeriön toimeksiannosta. Siinä esitettiin materiaalitehokkuuden palvelukeskuksen tarve Suomeen, ja esitettiin sen sijoittamista Motivan yhteyteen [19]. Materiaalitehokkuuden edistämisen katsottiin kuuluvan pääosin julkishallinnon tehtäviin, koska toistaiseksi sen ei katsottu olevan yritystaloudellisesti kannattavaa. Raportissa materiaali- ja ekotehokkuudella sekä jätteen synnyn ehkäisyllä tarkoitetaan samaa asiaa, mikä näin jälkikäteen tarkasteltuna on melko tiukka rajaus. Materiaalitehokkuuden palvelukeskuksen keskeiseksi

tehtäviksi määriteltiin selvityksessä hankkeiden koordinointi, toimintamallien ja konseptien kehittäminen ja kokeilu, asiantuntijapalveluiden välittäminen, tiedottaminen, neuvonta ja koulutus.

Ympäristöministeriön tilaamassa jatkoselvityksessä materiaalitehokkuuden palvelukeskuksen keskeisiksi tehtäviksi määriteltiin olla palvelutyökalujen kehittäjä ja kehittämisen aloitteentekijä materiaalitehokkuutta edistävien palvelujen markkinoilla yrityksille, toimialajärjestöille, julkisten palvelujen tarjoaville ja muille organisaatioille. Tällaisia työkaluja olivat muun muassa materiaalitehokkuuskatselmukset, Masco-toimintamallit, tietokanta- ja informaatiopalvelut sekä ns. best practise-mallit. [20] Selvitysten pohjalta ajatus materiaalitehokkuuden valtakunnallisesta palvelu-keskuksesta esitettiin Suomen kestävän tuotannon ja kulutuksen ohjelmassa vuonna 2005. Kauppa- ja teollisuusministeriö (nykyisin työ- ja elinkeinoministeriö) ja ympäristöministeriö järjestivät rahoituksen Motivan materiaalitehokkuushankkeelle ja yksikkö perustettiin Motivaan vuonna 2008.

Kansallinen materiaalitehokkuusohjelma julkaistiin vuoden 2014 alussa. Se esittää kahdeksan toimenpidettä materiaalitehokkuuden edistämiseksi. Ne ovat 1. Materiaalitehokkuuden tutkimusohjelman käynnistäminen, 2. Teollisia symbiooseja edistävän kansallisen toimintamallin luominen, 3. Toimintamalli resurssiviisaan alueellisen yhteistyön vahvistamiseen, 4. Tuettu määräaikainen materiaalikatselmustoiminta, 5. Materiaalitehokkuussopimukset, 6. Ympäristölupien keventäminen ja selkeyttäminen, 7. KV- ja EU-vaikuttaminen materiaalitehokkuuspolitiikassa ja 8. EU:n life -ohjelman vahvistaminen suomalaisissa materiaalitehokkuushankkeissa [21].

2.2 Keinoja materiaalitehokkuuden parantamiseen

Materiaalitehokkaaseen tuotantoon kuuluvat luonnonvarojen säästeliäs käyttö, tehokas sivuvirtojen hallinta, jätteen määrän vähentäminen ja materiaalin kierrätys elinkaaren eri vaiheissa. Samalla tavoitteena on vähentää tuotteiden haitallisia ympäristövaikutuksia koko elinkaaren aikana. [1; 21] Materiaalitehokkuuden kannalta erityisesti tuotannon sivuvirtojen materiaalihyödyntäminen on tärkeää. Materiaali- ja energiatehokkuus kattavat yhdessä yritysten resurssitehokkuuden, eikä niitä voi täysin erottaa toisistaan. Materiaalitehokkuuden potentiaalın hyödyntäminen vaatii tuotesuunnittelun, kierrätyksen ja teknologian kehittämistä ja lisäksi tarvitaan myös ymmärrystä ja yhteistyötä teollisuuden, palveluiden ja julkisen hallinnon toimijoiden välillä. [21] Saksassa on arvioitu, että materiaalitehokkaalla toiminnalla maan potentiaalinen vuotuinen säästö muoviteollisuudessa on jopa 2 miljardia euroa. Tulevaisuudessa raaka-aineiden kysynnän kasvaessa ja uusiutumattomien luonnonvarojen ehtyessä jäte- ja kemikaalikustannukset nousevat ja tekevät materiaalitehokkuuden parantamisesta entistä kannattavampaa. [22]

Keinoja materiaalitehokkuuden parantamiseen on esitetty kuvassa 2. Muoviteollisuudessa keinot voivat liittyä esimerkiksi tuotantoprosessien tehostamiseen tai kierrätyksen lisäämiseen, mutta toisaalta myös tuotesuunnitteluun, kuten tuotteen keston ja käytettävyyden parantamiseen tai tuotteen modulaarisuuteen. Materiaalitehokkuutta yrityksissä voidaan arvioida materiaalien käyttöön liittyvistä toimintatavoista. Keskeisten materiaalien kulutusmäärät ja hävikkiprosentti, tuotannossa käytetyn uusioraaka-aineen määrä ja prosenttiosuus sekä syntyvien jätteiden määrät ja niiden kierrätystehokkuus ja hyödyntämisprosentti ovat muutamia esimerkkejä tekijöistä, joiden seuraaminen on kannattavaa. [23]



Kuva 2. Keinoja materiaalitehokkuuden parantamiseen [22].

Materiaalitehokkaassa toiminnassa voidaan yleisesti pyrkiä vähentämään materiaalin tuotantoa ja käyttöä. Allwood *et al.* toteavat katsauksessaan, että asiaa voidaan lähestyä joko nykyisen tai uuden, erilaisen, tuotesuunnittelun kautta ja toimijoina voivat olla sekä suunnittelijat, käyttäjät että tuottajat (taulukko 1). [3]

Taulukko 1. Mahdollisia materiaalitehokkuutta lisääviä keinoja eri toimijoiden kannalta [3].

Suunnittelijat		Käyttäjät		Tuottajat
<i>Nykyinen tuotesuunnittelu</i>	<i>Uusi tuote-suunnittelu</i>	<i>Nykyinen tuotesuunnittelu</i>	<i>Uusi tuote-suunnittelu</i>	<i>Nykyinen tuotesuunnittelu</i>
Tuotteen eliniän pidentäminen	Tekeminen vähemmällä / tekeminen ilman	Intensiivisempi käyttö	Modulaarisuus	Ominaisuuksien parantaminen
Kunnostuksen suunnittelu	Tuotteen keventäminen Dematerialisointi	Pitkäikäisempi käyttö Jälleenmyynti Huolto	Kunnostus	Komponenttien uudelleenkäyttö Saannon parantaminen

Yritysten innovatiivisuuden kasvattaminen ja sitä myötä uusien tuotteiden kehittäminen voivat tukea yrityksen resurssitehokkuutta. Tuotesuunnittelussa on otettava huomioon tuotteiden käyttövarmuus, pitkäikäisyys ja käytöstä poistettavan tuotteen uudelleen käyttö tai hyödyntäminen. Haasteena suunnittelussa voi olla tasapainon löytäminen materiaalitehokkuuden ja energiatehokkuuden välille, koska toisinaan energiatehokkuuden lisääminen voi johtaa suuremman materiaalmäärän käyttöön. [1]

Tuotteiden pitkäikäisempi käyttö soveltuu erityisesti sellaisille tuotteille, jotka aiheuttavat vähän ympäristövaikutuksia käyttönsä aikana, mutta paljon ympäristövaikutuksia tuotantonsa aikana. Eräs keino materiaalien pidempiaikaiseen hyödyntämiseen olisi mahdollisuus jakaa tuote käyttönsä jälkeen komponentteihin, joita voitaisiin hyödyntää jälleen uusissa tuotteissa. Materiaalitehokkuusstrategioista tuotteen iän pidentäminen ja komponenttien uudelleenkäyttö liittyvät tuotteen ensimmäisen eliniän päättymiseen. Toisena vaihtoehtona on tuotteiden suunnittelu siten, että vähennetään materiaalinkäyttöä. Mahdollisia keinoja tähän ovat materiaaliominaisuuksien jalostus (esim. optimoimalla prosessointia), materiaalien korvaaminen toisilla, käytettävän materiaalin määrän vähentäminen optimoimalla designia tai materiaalin tuottaman palvelun dematerialisointi. [3]

2.3 Työntekijöiden osaaminen ja resurssitehokkuus

Työntekijöiden perusosaaminen tukee resurssitehokkuutta. Kun työntekijä osaa työhön liittyvät perusasiat hyvin, virheiden määrä todennäköisesti alenee ja virheiden syntymistä on myös helpompi ennakoida. Samalla kattavalla peruspohjатаidolla on helppoa omaksua uusia asioita. Valitettavan usein perusosaamista ei kuitenkaan osata arvostaa: usein oikein suoritetusta työstä ei anneta kiitosta, mutta virheiden sattua syyllinen kaivetaan esiin.

Jokaisen uuden työntekijän osaaminen on hyvä kartoittaa. On väärin olettaa, että uusi työntekijä osaa kaiken, sillä yrityksen vanhoille työntekijöille itsestään selviltä tuntuvat asiat eivät välttämättä ole yhtä selkeitä uusille työntekijöille. Uusien työntekijöiden osaamista ja tietotaitoa tukee erityisesti hyvä perehdytys työtehtäviin ja työympäristöön. Hyvä ammattitaito hyödyttää sekä asiakkaita, yritystä että työntekijöitä. Oppimisella, osaamisella ja omien taitojen osoittamisella onkin siten oma merkityksensä työntekijöiden hyvinvoinnin kannalta. [24]

Perehdytys luonnollisesti vie työaika sekä henkilöstöhallinnolta että työnjohdolta. Samalla työnopastuksessa käytettävä työaika voi alentaa tuottavuutta. On kuitenkin huomioitava, että hyvin toteutettu perehdytys vähentää oppimiseen käytettävää aikaa ja siten pienentää kustannuksia. Onnistunut perehdytys voi lisäksi vähentää työntekijöiden vaihtuvuutta. [25] Muita perehdytyksen hyötyjä ovat työssä syntyvien virheiden sekä virheiden korjaamiseen kuluvan ajan vähentyminen, poissaolojen vähentyminen sekä kustannussäästöt erilaisten häiriötekijöiden vähentyessä. Osaamisen myötä henkilö osaa lisäksi tarvittaessa muuttaa toimintatapojaan tai kehittää uusia. [24]

Perusosaamisen lisäksi myös työntekijöiden osaamisen kehittäminen on tärkeää. Osaamisen kehittämällä voidaan kasvattaa yrityksen tuottavuutta, lisätä innovaatioita sekä vähentää sairauspoissaoloja. Osaamisen kehittäminen näkyy myös lisääntyneenä mielekkäänä työnä. Työpaikoilla osaamista voidaan kehittää ja ylläpitää esimerkiksi oman alan seminaarien ja konferenssien avulla, erilaisilla henkilökoulutuksilla, henkilökohtaisella tai ryhmässä tapahtuvalla mentoroinnilla, osallistumalla työpaikan tutkimus- ja kehityshankkeisiin ja projekteihin, ammattikirjallisuutta seuraamalla, perehdytyksen avulla ja työtehtävien kierrättämisellä. [26; 27] Muita osaamisen kehittämistä tukevia välineitä ovat osaamiskartoitukset, henkilökohtaisen kehityssuunnitelman laadinta esimerkiksi kehityskeskustelun yhteydessä sekä Yt-lain edellyttämät henkilöstö- ja koulutus suunnitelmat [26].

Osaamisen kehittämisessä on kuitenkin monia haasteita. Yritystasolla osaamisen kehittäminen voi helposti jäädä toissijaiseksi tavoitteeksi, koska sitä ei välttämättä nähdä riittävän tarpeellisena investointina tulevaisuuden kilpailukyvyn kannalta. Osaamisen kehittämistä vaikeuttavat suunnitelmallisuuden puute ja osaamisen kehittämisen irrallisuus organisaation strategiasta ja tavoitteista; koulutus- ja kehityspalvelujen tarjonnan laajuus ja kirjavuus; aikuisille suunnatun ohjauksen puute ja myös kysynnän ja tarjonnan kohtaamattomuus. Työntekijätasolla suunnitelmallisuuden ja tiedon ja erityisesti ajan puute ovat haasteita. Tutkimusten mukaan työntekijät kuitenkin arvostavat kehittymismahdollisuuksia ja mahdollisuutta oppia uutta työn kautta. Tällä on suuri merkitys myös työssä viihtymiseen ja siksi olisi tärkeää, että työnantajat tarjoavat mahdollisuuksia itsensä kehittämiseen. [26] Muutamia muoviteollisuuteen liittyviä koulutuspalveluja on mainittu selvityksen viimeisessä luvussa.

3 Muoviteollisuuden materiaalitehokkuus

Muovit voidaan jakaa kolmeen pääryhmään; kestopuoveihin, kertamuoveihin ja elastomeereihin. Kestomuoveja muotoillaan ja sulatyöstetään lämmön sekä paineen avulla. Kestomuoveja voidaan pehmittää ja muotoilla myös uudelleen, koska molekyyliketjujen väliset sidokset ovat heikot. Kertamuovien rakennesijaan on pysyvä, koska niiden polymeeriketjut ovat vahvasti ristosilloittuneita. Ne valmistetaan hartasista ja kovettimesta sekoittamalla ja niissä käytetään usein myös erilaisia lujitteita. Elastomeerit koostuvat pitkistä ketjumaisista molekyyleistä, jotka ovat järjestäytyneet sattumanvaraisesti ja ristosilloittuneet. Ne voivat kuitenkin liukua toistensa ohi ja näin palautua suuristakin muodonmuutoksista. [28-32]

Käytetyimmät kestopuovien sulatyöstömenetelmät ovat ekstruusio ja ruiskuvalu. Ekstruusiossa raaka-aine syötetään sylinteriin, missä se plastisoidaan lämmön ja ruuvien avulla. Sulatilassa oleva muovi pursotetaan suuttimen läpi ja jäähdytetään vedellä tai ilmalla. Ekstruusio on jatkuvatoiminen prosessi, jota käytetään erilaisten profiilien, putkien, levyjen ja kalvojen valmistukseen. Myös ruiskuvalumenetelmässä raaka-aine plastisoidaan sylinterissä lämmön ja paineen avulla, mutta sen jälkeen muovi ruiskutetaan korkealla paineella muottiin. Muotti jäähdytetään ja kappale irroitetaan muotista. Ruiskuvalussa tuotannon materiaalitehokkuutta on parantanut siirtyminen yhä enemmän kuumakanavien käyttöön, jolloin vältetään valukanaviin jääneeltä materiaaalilta. Valukanavat kierrätetään takaisin prosessissa rouheena, mutta se on kuitenkin kustannuksia aiheuttava vaihe. Kuumakanavien käytön yleistymiseen on vaikuttanut niiden hintojen halpeneminen.

Muita kestopuovituotteiden valmistusmenetelmiä ovat muun muassa lämpö- ja puhallusmuovaus sekä rotaatiovalu. Puhallusmuovausta käytetään onttojen muovikappaleiden, kuten pullojen ja kanisterien valmistukseen. Lämpömuovauksessa muovilevyille tai -kalvolle annetaan haluttu tuotemuoto korotetussa lämpötilassa muotin avulla. Rotaatiovalulla valmistetaan suuria, onttoja kappaleita jauhemaisesta raaka-aineesta suljetulla, pyörivällä muotilla.

Yleisimmin käytetyt muoviraaka-aineet ovat polyolefiineja; polyeteenejä (PE) tai polypropeeneja (PP). Käytetyimmät polyeteenit ovat PE-LD, PE-MD, PE-HD, PE-LLD ja PE-X. Muita tärkeitä kestopuoviraaka-aineita ovat muun muassa PS, PET, PVC, PMMA, PC, PA, ABS ja POM. Erikoismuoveja ovat muun muassa PSU, PPSU, PES, PEEK ja PTFE.

Muoviteollisuuden käyttämät kestumuviraaka-aineet toimitetaan useimmiten granulaatteina suoraan raaka-ainevalmistajilta. Kertamuoviraaka-aineet toimitetaan kaksikomponenttisina nesteinä, mukaan lukien hartsi ja kovetin. Kone- ja laitevalmistajien käyttämät muovikomponentit joko alihankintaan muovituotevalmistajilta tai vaihtoehtoisesti työstetään itse puolivalmisteista kuten levyistä ja tangoista. Tyypillisiä muoveja sisältäviä tuotteita ovat erilaiset kulkuneuvot sekä sähkö- ja elektroniikkalaitteet.

Kun tarkastellaan muovituotteita valmistavan tuotantoyksikön materiaalitehokkuutta, tärkeimpiä tarkasteltavia virtoja ovat tuotantomäärä (output) ja syntyvän kokonaisjätteen tai sivuvirran määrä. Tuotantojätettä syntyy sulatyöstöprosessin eri vaiheissa sekä muissa kohdissa valmistusprosessia kuten leikkaamisessa, kokoonpanossa ja painatuksessa. Muovien kierrätyksellä tarkoitetaan useimmiten muovijätteen mekaanista kierrätystä. Kuitenkin myös tuotteen tai tuotteenosan uudelleenkäytössä materiaali säästyy ja tulee käytetyksi uudelleen, mutta ilman materiaalirakenteen rikkovaa käsittelyä. Vaihtoehdot muovituotteen uudelleen käyttämiseksi sen elinkaaren päässä ovat melko rajalliset. Uudelleenkäyttö on vaihtoehto lähinnä joillekin jakelu- pakkaustuotteille.

3.1 Materiaalien valinta ja materiaalimäärän rajaus

Muovituotteiden valmistuksessa on tärkeää valita kuhunkin sovelluskohteeseen oikea materiaali. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että valitulla materiaalilla tulee olla tietty ominaisuustaso, mutta materiaalin ei tarvitse täyttää ylimääräisiä vaatimuksia, joita tuotteen/palvelun käyttö ei vaadi (toisin sanoen ei kannata valita ”liian hyvää” materiaalia). Valintaperusteiden kannalta on tarkasteltava koko muovin tuotantoprosessia. Kilohinnaltaan edullisin raaka-aine ei välttämättä ole kustannustehokkain vaihtoehto, jos materiaalin vaatimat jälkikäsittelyt ovat hankalia tai kalliita toteuttaa. Valintaa tehdessä onkin tärkeää ottaa huomioon muovin käytettävyyden aina prosessoinnista ja jälkikäsittelymenetelmiin asti. Myös tuotteiden lopullisella kestävyydellä on merkitystä. Väärät materiaalivalinnat eivät vaikuta vain alkuperäiseen raaka-aineen hintaan, vaan nostavat kustannuksia tuotteen elinkaaren kaikissa vaiheissa [33]. Huomionarvoinen asia liittyen muovien materiaalitehokkuuteen on muovien tiheys ja tilavuushinta. Useimmiten eri raaka-aineita verrataan toisiinsa pelkästään kilohinnan perusteella. Tarvittavaan raaka-aineen määrään vaikuttaa kuitenkin myös muovin tiheys. Yleisimmin käytettyjen muovien tiheys voi vaihdella esimerkiksi PP:n ja PE:n hieman yli 0,9 kg/dm³:sta aina PVC:n 1,4 kg/dm³:n. Erikoismuovien ja lasikuitulujitettujen muovien tiheys voi olla tästä vielä paljon suurempikin.

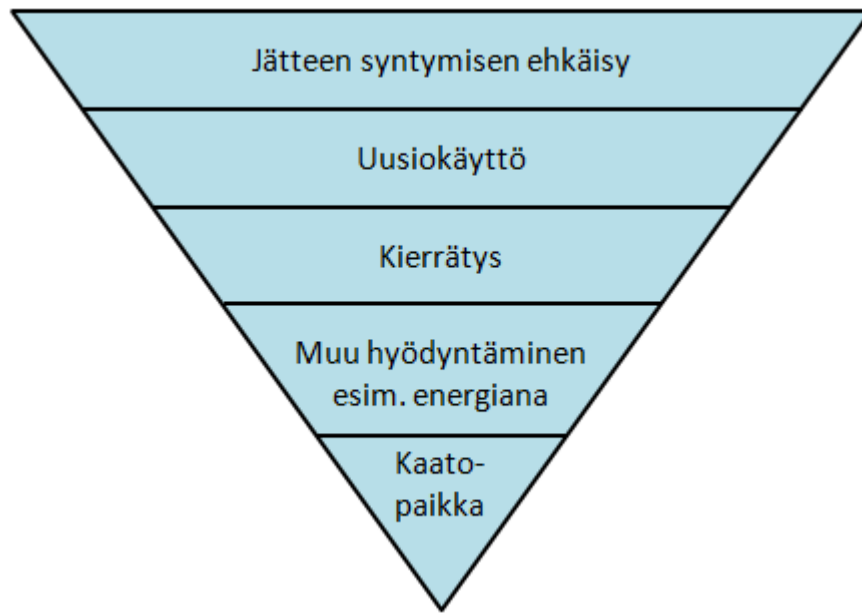
Asiakkaiden ja standardien tuotevaatimukset voivat asettaa rajoituksia neitseellisten materiaalien ja kierrätysmateriaalien käytölle, vaikuttaen näin materiaalitehokkuuteen. Tuotteilta voidaan vaatia esimerkiksi

ylilaatua. Raaka-aineiden ja tuotantomenetelmien kehittyessä standardien tai asiakkaiden edellyttämä laatu- tutaso olisi joskus mahdollista saavuttaa vähäisemmällä materiaalikäytöllä, mutta ne saattavat vaatia tuotteelta esimerkiksi tietyn seinämän- tai kalvonpaksuuden. Myös kierrätysmateriaalien käytölle voidaan asettaa rajoituksia, vaikka niitä käyttämällä tuotteen tekniset ja muu laatuvaatimukset täytyisivätkin. Standardit ja asiakkaat voivat vaatia esimerkiksi, että tuotteet tulee valmistaa 100 % neitseellisistä raaka- aineista.

Eräs keino resurssien tehokkaampaan hyödyntämiseen on tuotannossa käytettävien raaka-aineiden mää- rän vähentäminen. Käytettävien materiaalien rajaaminen vain muutamaaan lajikkeeseen takaa paremman osaamisen juuri näistä materiaaleista - jos käytettäviä materiaaleja on kymmeniä, on osaaminen kunkin materiaalin kohdalla usein heikompaa. Materiaalilajikkeiden vähentäminen voi aiheuttaa valmistettavissa olevien tuotteiden kirjon supistumisen, mutta toisaalta, kun yrityksen tietotaito ja maine kyseisten muu- taman materiaalin osaavana valmistajana kasvaa, voi syntyä myös uusia tuotesovelluksia ja asiakaskuntia.

3.2 Kierrätys ja uusiokäyttö

Materiaalien uusiokäyttö ja kierrätys ovat saaneet enemmän jalansijaa nykyisessä tuotannossa. Tähän kannustaa erityisesti ympäristöarvojen tärkeyden kasvu ja halu säästää luonnonvaroja. Nykyään uusiutu- mattomia raaka-ainelähteitä pyritään käyttämään vähemmän ja vastaavasti uusiutuvista raaka-aineläh- teistä johdettujen materiaalien osuutta pyritään kasvattamaan. Myös lainsäädäntö ohjaa kehitystä ympä- ristää säästävien ratkaisujen pariin. Euroopassa jätteen hyödyntämiseen ohjataan esimerkiksi Euroopan Unionin direktiivien avulla. EU:n jätteitä koskevan direktiivin (2008/98/EY) [34] mukaisesti jätehierar- kiassa tulisi tärkeysjärjestyksessä ensisijaisesti ehkäistä jätteen syntyä. Tästä seuraavana pykälänä on ma- teriaalin uudelleenkäyttö, jota seuraavat materiaalin kierrättäminen ja materiaalin hyödyntäminen muilla tavoin esimerkiksi energiana. Materiaalin hävittäminen kaatopaikalle on jätehierarkiassa viimeisellä si- jalla. Jätehierarkiaa voidaan kuvata kärjellään seisovalla kolmiolla, jossa tärkeys pienenee alaspäin men- täessä (kuva 3).



Kuva 3. EU:n jätehierarkian periaate. Jätteen käsittelyn tärkein vaihe on jätteen syntymisen ehkäisy. Kaato-paikoille päätyvien jätteiden määrä pyritään pitämään mahdollisimman pienenä.

Jätteen syntymisen ehkäisemisellä tarkoitetaan keinoja, joilla vähennetään sekä jätteen määrää (esimerkiksi materiaalien uudelleenkäyttö tai eliniän pidentäminen) että jätteen negatiivisia vaikutuksia ympäristöön ja ihmisten terveyteen. Materiaalien uusiokäytöllä viitataan toimintoihin, joiden avulla käytetyt tuotteet kerätään ja palautetaan käytettävään kuntoon samaan käyttötarkoitukseen esimerkiksi tuotteen pesemisen jälkeen (virvoitusjuomapullot, vesikannut). [35] Uusiokäytössä voidaan siis pyrkiä hyödyntämään koko tuote tai osa tuotteesta sellaisenaan. Muovien uusiokäyttöä pidetään yleensä suotuisempänä vaihtoehtona kuin kierrätystä, koska uusiokäyttö kuluttaa vähemmän energiaa ja raaka-aineita kuin materiaalien kierrätys. [36]

Jos materiaalin uusiokäyttö ei ole mahdollista, on pohdittava materiaalin kierrätysmahdollisuuksia. Kierrätysmateriaalit alentavat tuotteen kokonaisympäristövaikutuksia, ja samalla käyttö voi joissakin tapauksissa alentaa myös tuotteen hintaa ilman, että kierrätysmateriaalilla on tuotteen ominaisuuksia heikentäviä vaikutuksia [33]. Muovien kierrätysaste ei kuitenkaan ole kovin korkea huolimatta siitä, että muovi useimmiten on kierrätettävää materiaalia. Syynä tähän ovat muovien kierrätyksen haasteet 8 (luku 3.2.2). Jos kierrätystä onnistuttaisiin lisäämään, voitaisiin vähentää kasvihuonepäästöjä sekä raaka-aineiden ja fossiilisten polttoaineiden tuontia, lisätä kilpailukykyä ja luoda uusia työpaikkoja. [37]

3.2.1 Muovien kierrätysmenetelmät

Muovien kierrätysmenetelmät voidaan jakaa primääriseen, sekundääriseen ja tertiääriseen kierrätykseen. Joskus kierrätysmenetelmien mukaan luetaan myös kvartaarinen kierrätys [38], jolla sinällään ei kuitenkaan tarkoiteta materiaalin kierrätystä, vaan muovin polttamista energiantuotantoa varten. Primäärisellä kierrätyksellä tarkoitetaan muovin mekaanista uudelleenprosessointia tuotteeksi, jolla on alkuperäistä tuotetta vastaavat ominaisuudet. Tämä kattaa esimerkiksi tuotannosta syntyvien hukkapalojen hyödyntämisen uudelleen ekstruusiosykliissä [36].

Sekundäärisellä kierrätyksellä tarkoitetaan muovin uudelleenprosessointia tuotteeksi, jonka ominaisuusvaatimukset ovat alhaisemmat kuin alkuperäisellä tuotteella. Sekundäärisestä kierrätyksestä käytetään myös nimitystä mekaaninen kierrätys, koska muovi muunnetaan kierrätettävään muotoon erilaisten mekaanisten prosessien avulla (hienonnuks, pesu, erottelu, kuivaus, uudelleengranulointi ja kompaundointi uusiksi tuotteiksi). Mekaaninen kierrätys soveltuu vain kestopuoveille, jotka voidaan uudelleenmuotoilla lämmön avulla uusiksi tuotteiksi. Kertamuovien mekaanisen kierrätyksen potentiaali on paljon pienempi, koska kertamuovien kemiallinen rakenne on pysyvästi silloittunut valmistuksen aikana, eikä rakennetta voida enää sulattaa ja muotoilla uudelleen. Kertamuovit voidaan kuitenkin kemiallisesti kierrättää takaisin raaka-aineeksi, jota voidaan hyödyntää alusaineena esimerkiksi sementtiuuneissa. [35; 38; 39]

Tertiäärisellä kierrätyksellä eli kemiallisella kierrätyksellä tarkoitetaan muovin kemiallisten ainesosien takaisinsaantia. Tämä viittaa toimenpiteisiin, joilla muovijäte kemiallisesti hajotetaan takaisin monomeereiksi tai muiksi peruskemikaaleiksi, joita voidaan hyödyntää uudelleen polymeroinnissa tai polttoaineena. Tällä hetkellä kemiallisen kierrätyksen investointikulut ja energiankulutus ovat kuitenkin niin suuria, että vain hyvin laajamittaiset tuotantolaitokset ovat taloudellisesti toteuttamiskelpoisia. [35; 38]

3.2.2 Muovin kierrätyksen haasteet

Muovin (mekaanisessa) kierrätyksessä tai kierrätysasteen kasvattamisessa on monia taloudellisia, toiminnallisia ja teknisiä haasteita [3]. Taloudellisesti kestopuovien kierrättämisen toteuttamista vaikeuttavat kierrätetyn polymeerin hinta verrattuna neitseelliseen materiaaliin ja kierrätysprosessien kustannukset verrattuna muihin hyväksyttäviin hävitysmenetelmiin [38]. Koska kierrätysmateriaalia on tarkoitus käyttää osittain neitseellisten materiaalien korvaamiseen olemassa olevissa sovelluksissa, on kierrätysmateriaalin arvo kytketty suoraan neitseellisen materiaalin hintaan. Jalostajat eivät kuitenkaan ole valmiita maksamaan kierrätysmuovista samaa hintaa kuin neitseellisestä materiaalista, koska oletuksena on, että kierrätysmateriaalin laatu on alhaisempi kuin neitseellisellä materiaalilla. [35]

Toiminnallisia ongelmia muodostavat vaihtelut kierrätysmuovin laadussa ja määrässä verrattuna neutraaliseen materiaaliin sekä tiedon puute saatavilla olevista kierrätettävistä muoveista ja niiden soveltuvuudesta tiettyyn sovelluskohteeseen [38]. Yleisesti ottaen materiaalinkeräyksen ja lajittelun logistiikka ja infrastruktuuri ovat myös monimutkaisia ja viive tuotannon ja hävityksen välillä luo ongelmia eri materiaalien karakterisoinnin kannalta [3].

Muovin kierrätyksen suurimpia teknisiä haasteita on muovijätteen epäpuhtaus. Mitä kauemmas materiaalien prosessointiketjussa siirrytään, sitä epäpuhtaampia ovat kierrätettävät materiaalivirrat ja sitä vaikeampaa virtojen puhdistus korkealaatuisia tuotteita varten on [3]. Eri muovilajikkeet eivät välttämättä ole keskenään yhteensopivia, mikä johtuu luontaisesta sekoittumattomuudesta molekyyllitasolla ja muovien eri prosessointivaatimuksista. Pienikin määrä tiettyä polymeeriä dispergoituneena toiseen polymeerimatriisiin voi dramaattisesti muuttaa jälkimmäisen polymeerin ominaisuuksia. [35; 39] Ongelmia voi muodostaa myös samasta polymeeristä koostuvien, mutta kaupalliselta nimeltään erilaisten polymeerien sekoittuminen keskenään. Raaka-ainetoimittajat eivät esimerkiksi välttämättä kerro seosmateriaalien (esim. PC/ABS) komponenttien osuuksia muovituotteissa. Siten useista kaupallisista kierrätetyistä muoviladuista valmistetuista tuotteista ei välttämättä saada ominaisuuksiltaan samankaltaisia kuin tuotteesta, jossa materiaalina on käytetty yhtä neutraalista kaupallista raaka-ainetta.

Edellä mainittujen seikkojen valossa ei usein ole teknisesti toteuttamiskelpoista lisätä kierrätettyä muovia neutraaliseen polymeeriin ilman, että jotkut neutraalisen muovin laatuominaisuuksista (väri, kirkkaus, mekaaniset ominaisuudet) heikkenevät. Käytännössä kierrätysmuovin käytettävyys neutraalisen materiaalin korvaajana riippuu kierrätysmuovin puhtaudesta ja valmistettavan muovituotteen ominaisuusvaatimuksista. [38] Muovien mekaaninen kierrätys on toistaiseksi ollut yleensä toteuttamiskelpoista vain homogeenisille, yksittäisistä polymeereistä koostuville materiaalivirroille tai rajatuille polymeeriseoksille, jotka voidaan tehokkaasti erotella toisistaan yksittäisiksi polymeereiksi [35].

Vaikka kierrätysmateriaali voi olla joissain tapauksissa lähes neutraalisen materiaalin veroista, se voi aiheuttaa tuotteessa myös laatuongelmia. Tyypillisiä laatuongelmien aiheuttajia ovat materiaalin joukossa olevat epäpuhtaudet ja jakeen epätasalaatuisuus. Se tarkoittaa sitä, että kierrätysmuovin koostumus voi vaihdella siten, ettei se sisällä joko samaa muovia tai jos sisältää, se sisältää eri kauppanimiä jolloin myöskin ominaisuudet voivat vaihdella huomattavasti. Tuotteen laatuongelmien lisäksi kierrätysmuovien käyttö voi aiheuttaa ongelmia tuotannossa ja vaikuttaa negatiivisesti tuotannon tehokkuuteen. Useimmissa tapauksissa se on suurempi kierrätysmuovien käyttöä koskeva rajoite kuin vaikutus tuotteen laatuun. Eräissä tapauksissa kierrätysmuovien käyttöönotto kaksinkertaisti ekstruusiotuotantolinjan sei-

sokit. Näin ollen kierrätysmuovien käytöllä voi olla suuri kustannusvaikutus. Seisokkeja aiheuttavat prosessin vaikea hallittavuus ja esimerkiksi ylimääräiset sihdinvaihdot. Kierrätysmuovien käyttö voi lisätä myös prosessoinnissa tarvittavien apuaineiden käyttöä.

Kierrätysmuovien laatu riippuu suuresti kahdesta asiasta; miten syntypaikkalajittelu toimii ja miten materiaalin uusiointi toimii. Tuotanto-ongelmia aiheuttajat ovat pitkälle samoja, jotka heikentävät myös lopputuotteen laatua. Materiaalien laadun vaihtelu voi aiheutua epäpuhtauksista, kosteudesta ja vaihtelevasta koostumuksesta. Kierrätysmuovituotteiden laatuongelmat heijastuvat myös lopputuotteen imagoon. Nykyään kierrätysmuovien käytöllä voi olla kuitenkin joissain tapauksissa jopa positiivinen imagovaikutus. Aiemmin kierrätysmuovien käyttö yhdistettiin usein tuotteen huonoon laatuun. Varsinkin muovituotevalmistajien kokemukset kierrätysmuovien käytöstä olivat usein huonoja niiden aiheuttamien tuotanto-ongelmien takia. Eräs ongelmia aiheuttava tekijä on että kierrätysmuovieristä ei ole riittävästi teknistä informaatiota. Neitseellisistä raaka-aineista on olemassa tarkatkin ominaisuustaulukot, mutta kierrätysmuoveista tiedetään usein vain muovilaji.

3.2.3 Muovin kierrätysasteen parantaminen ja jätteiden hyödyntäminen

Tuotteiden kierrätettävyyttä tulisi ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Muovien kierrätettävyyttä voidaan helpottaa esimerkiksi vähentämällä muovissa käytettäviä vaarallisia aineita ja välittämällä asianmukaista tietoa muoveista tuottajilta kierrätysyrityksille. Esimerkiksi muovin kemiallista koostumusta ja lisäaineita koskevat merkinnät ja tiedot voitaisiin toimittaa muovijalostajille. [37] Vaihtoehtoisesti voitaisiin käyttää selkeää koodijärjestelmää tai muita viestejä tuotteissa, jotka helpottaisivat kuluttajia ja kierrättäjiä lajittelemaan muovituotteet. Koodista tulisi käydä ilmi materiaalin tarkka koostumus ja valmistusmenetelmä. [40]

Tulevaisuudessa yhä suurempi määrä yhteiskuntajätteestä tulee kierrättää. Tämä tarkoittaa, että kierrätysprosesseja tulee parantaa siten, että niiden avulla voidaan kierrättää yhä heterogeenisempiä muovityyppejä ja muovilajikkeita. Kierrätettävyyden parantamiseksi muoviteollisuus tarvitsee parempia keinoja tuoda enemmän, puhtaampia ja edullisempia muovijätteitä takaisin muovin tuotantokykliin. Keräysmenetelmiä ja erottelutekniikoita tulisi kehittää, jotta voidaan prosessoida myös koostumukseltaan ja puhtaustasoltaan vaihtelevampia materiaaleja. Kuluttajia tulisi myös rohkaista kierrättämään tuotteita enemmän. [40] Kuluttajien tietoisuuden lisäämiseksi voidaan järjestää konkreettisia toimia ja kampanjoita [41].

Kierrätystä ja materiaalikiertojen sulkemista voidaan edistää myös niin sanotuilla teollisilla symbiooseilla eli yritysten välisellä yhteistyöllä. Tällaisilla symbiooseilla yritykset voivat kohentaa resurssitehokkuut-

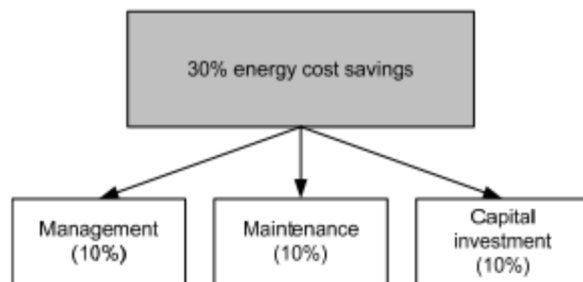
taan hyödyntämällä toistensa teknologiaa, osaamista, palveluita ja jätesivuvirtoja. Esimerkiksi toisen yrityksen tuotannon sivuvirta tai jäte voi olla toisen yrityksen raaka-ainetta. Energiahyötykäyttöön ohjautuu materiaaleja, joita tehokkaamman poikkiteollisen yhteistyön ja teollisten symbioosien kautta voitaisiin hyödyntää ja käyttää uudelleen. Yritysten yhteistyön avulla jätevirtoja voitaisiin mahdollisesti poistaa tai vähentää ja samalla saavutettaisiin pienemmät ympäristöpäästöt ja taloudellista etua (alentuneet raaka-ainekustannukset ja jätemaksut). [1; 42]

4 Energiatehokkuus

Panostaminen muoviteollisuuden energiatehokkuuteen on tärkeää niin ympäristön kuin yrityksen sisäisten kustannussäästöjenkin kannalta. Ympäristön kannalta haitalliset ja vähennettävissä olevat tekijät on usein määritelty lainsäädännössä, mutta samat tekijät ovat nähtävissä myös merkittävänä kilpailuetuna tuotantoteollisuudessa. Energian hinta on noussut viime vuosikymmeninä jatkuvasti, eikä ole syytä uskoa, ettei se nousisi edelleen. Muun muassa ympäristötietoisuuden lisääntyminen, energiaverojen korotukset, yritysvastuun kasvaminen ja tuotteiden kuljetusmatkojen vähentämiseen pyrkiminen ovat asioita, jotka tulevat vaikuttamaan – ja vaikuttavat jo nyt – yritysten ja kuluttajien maksamaan hintaan käyttämästään energiasta välillisesti tai välittömästi. [43; 44]

4.1 Energian käytön kartoittaminen

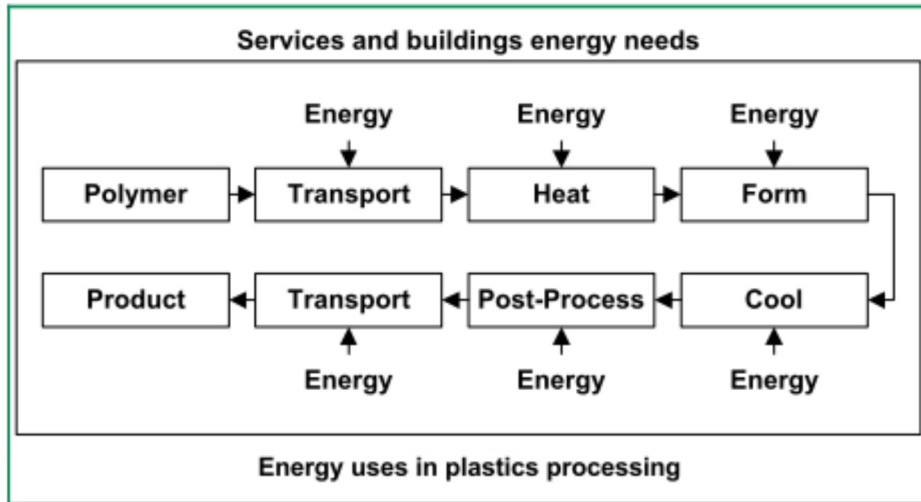
Tuotantolaitoksessa energiasäästöjä voidaan lähteä tavoittelemaan kolmella eri keinolla: määrätietoisella ympäristöjohtamisella, jolloin varsinaisia hankintoja ei välttämättä tarvita; ylläpitämällä ja huoltamalla tuotantolaitosta ja sen laitteita säännöllisesti; tarvittaessa panostamalla rahallisesti energiatehokkaampiin laitteisiin. [44]



Kuva 4. *Energiankulutuksen laskuun tähtäävät toimet teollisuudessa.* [44]

Muovituotteen valmistuksen energiatehokkuuden määrittäminen tulee aloittaa kartoittamalla tuotteen koko valmistusketju ja sen sisältämät energiavirrat. Kun koko tuotantoketjun laitteiden ja välineiden kuluttamat energiat ja niistä aiheutuvat kustannukset on määritetty, voidaan erottaa energiaa kuluttavimmat prosessin vaiheet ja se, missä kohdassa energian käyttöä voidaan optimoida. Mahdollisten energiasäästö-

jen kohteiden löytymistä helpottavat kysymykset, missä, milloin, miksi ja kuinka paljon energiaa käytetään. Nykypäivänä myös älykkäiden prosessinhallintasovellusten avulla tuotannon vaiheiden ja siten myös energiankulutuksen seuraaminen on helpompaa. [33; 43]



Kuva 5. Valmistusprosessin energiankulutuksen karkea kartoittamisesimerkki. [33]

Kun energiankulutus on kartoitettu tuotannon eri segmenteissä, on helpompi tutkia, missä kohdassa prosessia mahdollisia säästöjä on mahdollista saavuttaa. Esimerkkejä helpoista säästökeinoista on useita. Usein tuotannon virrankulutus ei ole vakio vuorokauden ympäri, vaan erityisesti laitteiden käynnistyessä energiaa kuluu suuria määriä. Maksimikulutuspiikki tulisikin tasoittaa esimerkiksi laitteiden portaittaisella käynnistyksellä. Tuotantolaitteita ajetaan myös usein energiankulutukseltaan huonolla hyötysuhteella, ts. liian pienellä volyyymilla. Hyötysuhteessa tulisi päästä mahdollisimman lähelle 1:tä optimoimalla tuotantonopeus tai käytettyjen laitteiden koko. Virrankulutuspiikkejä voidaan välttää esimerkiksi ympärivuorokautisella tuotannolla, jolloin vähennetään myös päiväajan kalliimman sähkön käyttöä. Monet tutkimukset ovat myös osoittaneet, että nopeammat tuotantoprosessit voivat olla merkittävästi hitaita prosesseja energiatehokkaampia. [33; 43]

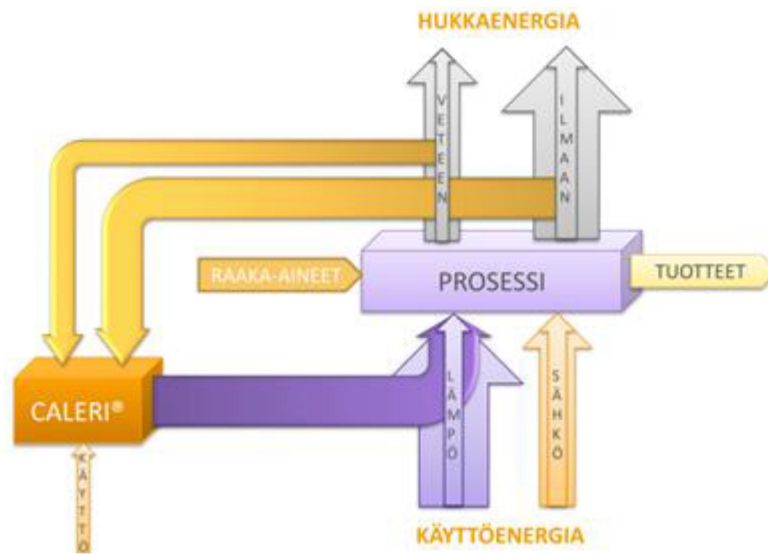
4.2 Energian säästökohteet muoviteollisuudessa

Energian käyttö muovituotteiden valmistuksessa on yleensä valmistettavien tuotteiden massa suhteutettuna yksi merkittävimmistä ympäristöllisistä haitoista. Pienelläkin energiankulutuksen vähentämisellä voidaan siksi saada aikaan huomattavia rahallisia säästöjä. Muoviteollisuudessa suhteellisen helposti havaittavia energiankäytön leikkauskohteita on useita. [43] Eri muovien prosessointi vaatii erilaisen määrän

energiaa. Tähän vaikuttavat sulamis- ja lasisiirtymälämpötilojen erojen lisäksi myös muovien kiteisyysaste. Esimerkiksi biomuovien prosessointi on usein energiatehosta niiden alhaisen prosessointilämpötilojen vuoksi.

Lämpömuovauksessa käytettävä suuri lämpömäärä tekee valmistusmenetelmästä energian kulutuksen kannalta erittäin epäedullisen menetelmän. Ruiskuvalussa taas suurien lämpötilavaihteluiden vähentämisellä eri syklien välillä sekä jäähdytysajan optimoimisella voitaisiin usein saada aikaan huomattavia energiasäästöjä. Syklijän lyhentäminen kasvattaa myös tuotantokapasiteettia. Lisäksi esimerkiksi hydraulisten laitteiden sijasta täysin elektronisten ruiskuvalukoneiden käytöllä voidaan saada aikaan jopa 30 - 60 % säästö energiankulutuksessa. Tällöin lyhenevät syklijat lisäävät tuotannon kannattavuutta entisestään. Ekstruusiossa mahdollisuudet energiasäästöihin olisivat yleensä erittäin potentiaaliset, mutta laitteiden käytöllä puoliteholla virrankulutus kasvaa tuotantonopeuteen nähden suureksi, jolloin hyötysuhde ei enää ole energiataloudellisesti kannattava. Ylisuurten moottorien käyttö puoliteholla on usein hyvin tehotonta, joskin pienten moottorien käyttö täydellä teholla ei myöskään ole energiatehokasta. Moottorien koko ja teho tulisikin energian käytön takia suunnitella tarkasti jo etukäteen. Muita merkittäviä energian säästökohteita muoviteollisuudessa ovat esimerkiksi polymeerien kuivaus ennen prosessointia, jossa erittäin suuri määrä lämpöä voitaisiin kerätä talteen sekä paineilman käytön ja tuottamisen optimointi. [33; 43]

Myös hukkaenergian talteenotto ja kierrättäminen esimerkiksi ruiskuvalussa voivat vähentää tuotannon energiankulutusta merkittävästi. Jo termodynamiikan peruslain, energian säilymisen perusteella voidaan päätellä, että pyrkiminen energian säilyttämiseen valmistusprosessin sisällä kannattaa. Muun muassa ruiskuvalukappaleen jäähdytyksen aikana vapautuva energia voidaan hyödyntää pumpaamalla kuumentunut jäähdytysvesi aktiivisesti seuraavaa annosta plastisoivalle ruuville. Lisäksi ruuvien tarkalla lämmöneristyksellä voidaan vähentää lämmön karkaamista prosessista. Kaupallisesti lämpöenergian uudelleenkäyttöön on saatavana esimerkiksi Calefan valmistama Caleri®, hukkalämmön talteenottojärjestelmä. Calerin periaatteena on varastoida prosessista vapautuva lämpöenergia ja palauttaa se takaisin osana prosessiin kuluvaan käyttöenergiaa. Tällöin sekä prosessista poistuva että prosessiin tuotava energia vähenevät. [43; 45]



Kuva 6. Caleri®, lämmön talteenottoon kehitetty järjestelmä. [45]

Millä tahansa teollisuuden alalla on lisäksi mahdollista säästää sähköenergian käytössä ja siitä aiheutu-
vissa kustannuksissa taajuusmuuttajia käyttämällä. Taajuusmuuttajat ovat laitteita, jotka säätelevät tuotantolaitteiden moottorien momenttia ja nopeutta. Kun energian syöttöä laitteeseen optimoidaan vaatimustason kanssa, turhalta energian kulutukselta vältytään. ABB arvioi, että taajuusmuuttajia hankkiva yritys voi saada laitteisiin sijoittamansa rahat takaisin jo muutamassa kuukaudessa energiasäästöjen ansiosta. [46]

Yleisesti voidaan sanoa, että muoviteollisuuden millä tahansa osa-alueella energiankulutuksesta noin 20 - 25 % on vähennettävissä ilman merkittäviä rahallisia panostuksia 2 - 5 vuodessa. Tämä säästö nähdään suoraan yrityksen saavuttamissa voitoissa. Suurempien energiasäästöjen tavoitteluun vaaditaan vaihtoehtoisten menetelmien, työkalujen tai jopa uusien tuotantolaitosten hankintaa. Toisaalta silloin säästöjä voi muodostua jopa yli 50 %. [43; 44]

5 Materiaalitehokasta toimintaa tukevat palvelut

Materiaalitehokkuuden kehittämiseen tähtävillä palveluilla tarkoitetaan tässä raportissa palveluja, joita käyttämällä yritykset ja tuotantolaitokset voivat parantaa sekä kehittää valmistuksensa materiaali- tai energiatehokkuutta tai parantaa tuotteidensa elinkaaren aikaista materiaali- tai energiatehokkuutta. Tuotteiden ekotehokkuutta ovat muun muassa niiden kierrätettävyyden parantaminen sekä tuotteiden ominaisuuksien ja kestävyuden parantaminen. Materiaalitehokkuusajattelua ja käytännön työkaluja sen parantamiseen on Suomessa kansallisella tasolla kehittänyt etupäässä Motiva Oy. Resurssitehokkuuteen tähtäviä palveluja tarjoavat myös yritykset sekä tutkimus- ja kehittämisorganisaatiot. Useat yrityksen toiminnan laadun ja tehokkuuden parantamiseen tähtäävät työkalut, perustuen usein Lean-ajatteluun, pitävät sisälleen myös materiaalivirtojen tarkastelua ja tehokkuuden parantamista.

Materiaali- ja energiatehokkuuden tarkastelun työkaluihin vaikuttavat hyvin monet asiat, jotka asettavat reunaehdoja niiden soveltamiselle. Niitä ovat esimerkiksi käytetyt tuotantomenetelmät ja tuotteet, yrityksen strategiset tavoitteet ja lainsäädäntö. Esimerkiksi tuotesuunnittelun tai markkinoinnin tavoitteet voivat vaikuttaa käytetyn työkalun valintaan ja soveltamiseen. Tässä raportissa palvelut on jaettu kolmeen pääryhmään materiaalitehokkuuden keinojen mukaan: yrityksen tai tuotantoyksikön materiaalitehokkuuteen, kierrätykseen ja uusiokäyttöön sekä tuotteisiin ja komponentteihin.

5.1 Yrityksen tai tuotantoyksikön materiaalitehokkuus

Tuotantoyksikön materiaalitehokkuudella tarkoitetaan tuotteiden valmistusta niin että materiaalin kulutus on mahdollisimman vähäistä kuitenkin niin, että tuotteen ominaisuudet ja laatu eivät heikkene. Yleensä tällaiset tarkastelumenetelmät pohjautuvat tuotantoprosessin panos/tuotos (input/output)-tarkasteluun. Prosessin materiaali-input voidaan määrittellä kilo- tai euromääräisesti. Tuotannon output voi olla prosessin tuotantomäärä tai esimerkiksi syntyvän sivuvirran tai jätteen määrä.

Tuotannon materiaalitehokkuutta tarkastelevia työkaluja ovat muun muassa materiaalikatselmus, tuotannon simulointi ja mallinnus, arvovirtakuvaus (Value Stream Mapping) ja materiaalivirta-analyysi (MFA).

5.1.1 Materiaalikatselemus

Motivan kehittämä materiaalikatselemus on teollisuudelle tarkoitettu käytännön työväline materiaalivirtojen hallintaan ja tehostamiseen. Motiva on kehittänyt katselmusta muun muassa pilottiprojektien kautta. Materiaalikatselemustyökalu on asiantuntijoiden ja konsulttien käytettävissä annetun koulutuksen jälkeen. Katselemus toteutetaan yhteistyössä ulkopuolisen konsultin ja yrityksen kanssa. Siinä käydään systemaattisesti läpi tuotannon materiaalivirrat säästökohteiden löytämiseksi. Raaka-ainekustannusten lisäksi myös energia- ja työvoimakulut sekä muut materiaaleihin liittyvät kulut kohdennetaan eri virroille. [47] Työ- ja elinkeinoministeriö tukee Suomessa materiaalikatselemusten tekemistä. Toistaiseksi vuoden 2014 loppuun asti voimassa oleva tuki kattaa konsultin työ- ja matkakustannuksista maksimissaan 40 prosenttia.

Tärkeä osa katselemointia on yhteisen ideoinnin kautta hakea konkreettisia toimenpiteitä tehokkuuden parantamiseksi. Toimenpiteet voivat tähdätä esimerkiksi kustannussäästöihin raaka-ainehankinnoissa, jätemaksuissa tai energiakustannuksissa, hävikin vähentämiseen, kierrätysvirtojen tehostamiseen, tuotantovirheiden vähentämiseen tai ylilaadun välttämiseen. [47]

Motivan materiaalikatselemuksen tavoitteena on käynnistää jatkuva kehitysprosessi tehokkuuden parantamiseksi. Katselemus käynnistetään aloituspalaverilla ja tarvittavien lähtötietojen keräämisellä. Lähtötietoja ovat muun muassa perustiedot yrityksestä ja sen prosesseista, materiaalisyötteet ja tuotokset sekä materiaalien käyttöön liittyvät kustannukset. Lisäselvityksillä, tuotantoprosesseihin tutustumalla ja haastatteilla hankitaan puuttuvat ja täydentävät tiedot varsinaista analyysiä varten. Saadut tulokset eli materiaalivirrat ja niihin liittyvät kustannukset (MFCA-menetelmä ISO 14051-standardin mukaisesti) esitetään taulukkoina tai esimerkiksi Sankey-diagrammeina. Tulosten perusteella ideoidaan konkreettisia parannustoimenpiteitä yhdessä yrityksen henkilökunnan kanssa niistä prosesseista, joissa on tunnistettu eniten säästöpotentiaalia. Toimenpide-ehdotukset ja niiden toteuttamiskelpoisuus sekä niiden avulla saavutettavat säästöt arvioidaan. Tehdyt toimenpiteet ja tulokset esitetään katselemusraportissa. Myös tarkempia investointilaskelmia ja investointien kannattavuuden arviointia voidaan liittää raporttiin. Hankkeen päätyttyä ja tilaajan hyväksytyä raportin sekä maksettuaan katselemuksen, tilaaja voi toimittaa työ- ja elinkeinoministeriöön maksatushakemusten tuen maksamiseksi. [47]

Katselemus kestää tyypillisesti 4-6 kk. Konsultin työpanos voi olla esimerkiksi 1 htkk. Materiaalikatselemukseen voi saada työ- ja elinkeinoministeriöltä hankeavustusta jopa 40 % konsultin työ- ja matkakustannuksista, jos käytetään Motivan hyväksymää konsulttia. Ajan tasalla oleva lista Motivan hyväksymistä

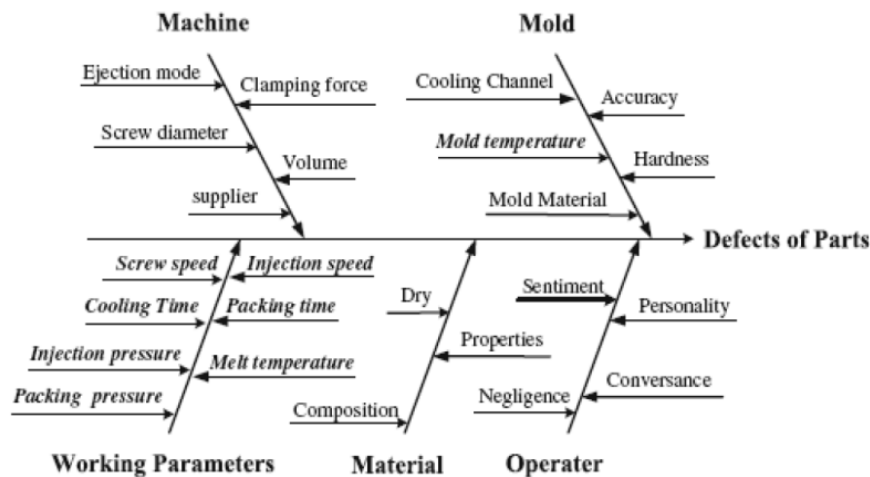
konsulteista löytyy Motivan ja TEM:n sivuilta. [47] Muoviteollisuuden materiaalikatselmuksiin on erikoistunut Nastolassa ja Lahdessa sijaitseva Muovipoli Oy, mikä on Motivan hyväksymä materiaalikatselmointiyritys.

5.1.2 Tuotannon simulointi ja mallinnus

Monivaiheisten valmistusprosessien hallinnan parantamiseksi voidaan tuotantoprosessien toimintaa mallintaa. Mallintamisen tarkoitus on tuottaa tietoa päätöksentekemistä varten. Tuotantoprosessit ovat usein monimutkaisia ja niiden korjaus-, investointi- ja seisokkikustannukset kalliita luoden tarpeita kustannusten minimoimiseksi. Tuotannon simuloinnin avulla pyritään luomaan vielä yksityiskohtaisempaa tietoa yksittäisten prosessien toimivuudesta ja käyttäytymisestä. Simulointia voidaan käyttää riskien pienentämiseen, komponenttien integrointiin, prosessien skaalaukseen sekä prosessien ennakoinnissa ja kontrolloinnissa [48].

Muovituotteiden valmistuksessa mallinnusta ja simulointia käytetään eniten ruiskuvalutuotannossa, mutta myös ekstruusioprosesseissa. Simuloinnissa voidaan hyödyntää matemaattista mallinnusta ja esimerkiksi neuroverkko- sekä ei-lineaarista laskentaa. Muovituotteita ja niiden valmistusprosesseja suunniteltaessa yksi haastavimmista ongelmista on tuotantonopeuden ja laadun optimointi kuitenkin mahdollisimman matalia valmistuskustannuksia tavoitellen. Äärimmäistä tehokkuutta ja kustannussäästöjä esimerkiksi ruiskuvalussa ei nykypäivänä kannata enää tavoitella ns. yrityksen ja erehdyksen keinoin, vaan valmistusprosessin kaikki osa-alueet tulisi ottaa alusta asti huomioon kustannusten minimoimiseksi ja laadun takaamiseksi. Varsinaisten tuotantoprosessien optimoimisen lisäksi valmistuskustannuksia voidaan vähentää laitteiden säännöllisellä ennakkohuollolla ja ylläpidolla. Yleensä ennakkohuolto tulee yritykselle edullisemmaksi, kuin rikkoutuneen laitteen korjaus. [49]

Tuotannon optimoitavat vaiheet voidaan jakaa neljään osa-alueeseen: kappale- ja muottisuunnitteluun sekä laitteen suorituskykyyn ja prosessiolosuhteisiin. Kappale- ja muottisuunnittelusta aiheutuvat kustannukset ovat varsinaisen prosessoinnin aikana kiinteitä, kun taas laitteen suorituskyky ja prosessointiolosuhteet voivat muuttua tuotannon eri vaiheissa. [49]



Kuva 7. Kalanruotomalli ruiskuvaluprosessin optimointiin vaikuttavista tekijöistä. [49]

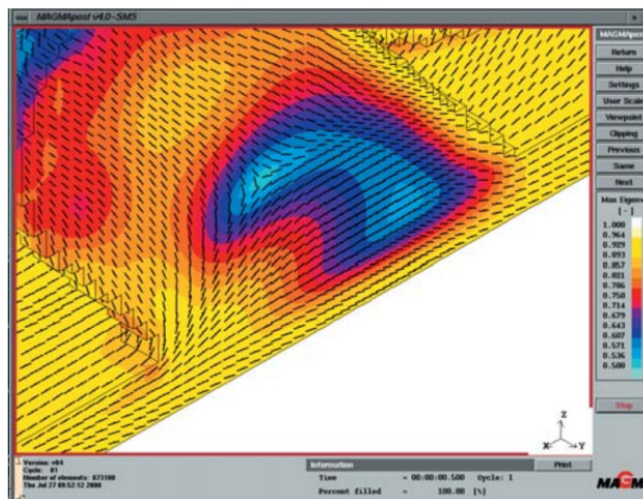
Kuvaan 7 on koottu tekijöitä, jotka osaltaan vaikuttavat ruiskuvalutuotteen laatuun. On epäilemättä selvää, että kun kaikki kuvassa mainituista tekijöistä aiheutuvat häiriöt minimoidaan, tuotannon laatu sekä tehokkuus kasvavat ja kustannukset pienenevät. Kun optimointi tapahtuu oikeita metodeja käyttäen, suunnittelun kustannustehokkuus kasvaa. Tässä kappaleessa tutustutaan muovituotteiden valmistusprosessien optimoimiseen ja käytössä oleviin optimointimenetelmiin.

Perinteisen ruiskuvalutuotannon optimoinnin ongelma on usein valmistusparametrien hidas tai jopa olematon hienosäätö. Kokeellisella suunnittelulla (design of experiments, DOE) yrityksen ja erehdyksen kautta ruiskuvaluparametreja optimoitaessa kallisarvoista aikaa ja resursseja käytetään tarpeettoman paljon. Lisäksi yleensä sykliäikää eniten rajoittava kappaleen jäähdytys saattaa jäädä pysyvästi liian pitkäksi, jolloin sykliäika pitenee merkittävästi ja tuotetta valmistetaan tehottomasti. Sykliäikää lyhentämällä ja energiaa säästämällä tuotteen valmistuksessa välttyttäisiin suurelta osalta kustannuksia. [49; 50]

Yksi tunnetuista laaduntarkkailuun ja tuotantotehokkuuden kasvattamiseen tarkoitetuista metodeista on japanilaisen Genichi Taguchin kehittämä kokeellinen suunnittelumenetelmä, joka perustuu optimaalisten prosessiparametrien etsimiseen matriisin avulla. Matriisi auttaa vähentämään tarvittavien parametrivaihtoehtojen läpikäymistä ja vähentää siten optimointiin käytettyä aikaa. Prosessia optimoitaessa Taguchimenetelmää käyttäen otetaan huomioon sekä valmistettujen kappaleiden dimensioiden keskiarvo että -hajonta. Keskihajontaa pidetään eräänlaisena signaalin häiriönä, joka suhteutetaan keskiarvoon. Mitä suurempi keskiarvon suhde on keskihajontaan nähden, sitä lähempänä optimaalista tulosta on päästy. [49]

Monimutkaisten ruiskuvaluprosessien optimointiin on kehitetty monia todellista prosessia simuloivia menetelmiä, joiden avulla käyttäjän on helpompi ymmärtää ja hallita kaikkia prosessiin ja itse lopputuottee-

seen vaikuttavia parametreja. Yksi merkittävistä ruiskuvaluprosessien simuloinnissa käytetyistä menetelmistä on Finite Element Method (FEM). Nimensä mukaisesti FEM:n periaatteena on jakaa tutkittava kappale erittäin pieniin osiin tai käyriin, jotta usein erittäin monimutkaisista valmistettavista kappaleista ei tulisi liian työläitä mallintaa. FEM:n avulla voidaan mallintaa muun muassa muotin täyttymistä, tuotteen ja muotin lämpötilamuutoksia sekä muovimateriaalin jäähtyessä muodostuvia jännityksiä ja muodonmuutoksia. Menetelmän avulla saadaan tuotettua visuaalisesti havainnollistavia kolmiulotteisia kuvia, joiden avulla niin prosessien kuin muottienkin suunnittelu ja optimointi on helpompaa. [49; 51]



Kuva 8. Prosessoinnin mallinnusta FEM:n avulla. [51]

Prosessoinnin aikaisia tuotannon optimointiin vaikuttavia tekijöitä voidaan hallita esimerkiksi Kistlerin Stasa QC -ohjelmiston avulla. Stasa QC on erityisesti ruiskuvaluprosessien optimointiin kehitetty työkalu, jonka avulla pyritään kasvattamaan prosessin stabiiliutta ja lopputuotteen laatua minimoimalla samalla sykli- ja asetusajat. Stabiiloimalla prosessi, lyhentämällä sykli-aikoja ja siten lisäämällä tuotantokapasiteettia lopputuotteiden yksikkökustannuksia saadaan pienennettyä. Lisäksi tuotteen laatu paranee. Perinteisestä kalliista ja aikaa vievästä parametrien optimoinnista poiketen Stasa QC:lla pyritään löytämään optimaaliset ruiskuvaluparametrit heti prosessoinnin alkuvaiheista alkaen. Ohjelmisto perustuu ehdotettujen parametrien pohjalta tehtyyn prosessin simulointiin, jonka avulla valmistusparametrit optimoidaan edelleen tavoitellun laadun mukaisiksi. [50]

Moldflow Plastics Xpert (MPX) -ohjelmistossa taas prosessin simulointi on yhdistetty prosessin hallintaan kokeellisen suunnittelun avulla, minkä vuoksi optimoinnin tehokkuus kasvaa merkittävästi. Ohjelmiston optimointiprosessi on jaettu kolmeen osioon. Prosessiasetuksessa käyttäjä määrittää oletettavat asetusarvot halutuille parametreille, joilla onnistunut tuote saadaan valmistettua. Prosessin optimointiosiossa automatisoitu ohjelma etsii optimoidut arvot kokeellisen suunnittelun kautta säilyttäen optimaalisen tuotteen laadun. Prosessin kontrollointiosiossa käyttäjän on vielä mahdollista hallita optimointivaiheessa tehtyjä asetuksia. [52] Muita tunnettuja tuote- ja muottisuunnittelussa käytettäviä simulointiohjelmia ovat muun muassa CadMold, Moldex 3D ja Solidworks.

Koska erilaisia simulointiohjelmia on lukuisia ja samoin mallinnus- ja simulointipalvelujen tarjoajia on Suomessa runsaasti, niitä ei ole mahdollista lähteä yksityiskohtaisesti esittämään tässä raportissa. Mallinnus- ja simulointipalveluja tarjoavat Suomessa yleisesti esimerkiksi insinööritoimistot sekä tutkimus- ja koulutuslaitokset.

5.1.3 Arvovirtakuvaus (Value Stream Mapping)

Arvovirta on tuotteen kulkema polku, joka alkaa raaka-aineista ja päättyy asiakkaalle. Se pitää sisällään kaikki materiaali- että tietovirrat tuotteen valmistamiseksi alkaen tilauksesta päätyen asiakkaalle. Arvovirtakuvaus on yksi Lean-ajatteluun pohjautuvista työkaluista. Siinä valitaan tuote tai tuoteryhmä, jolle hahmotellaan visualisoinnin avulla nykytilankuvaus prosesseineen, mukaan lukien tuotteen valmistukseen tarvittavat tuotantotekijät, kuten laitteet ja raaka-aineet. Perimmäinen tavoite on tunnistaa tekijät, jotka hidastavat prosessia sekä löytää ja eliminoida hukkamateriaalit ja sitä kautta parantaa materiaalihokkuutta. Nykytilan ja sen arvioinnin pohjalta muodostetaan tavoitetila, johon pyritään poistamalla prosessin tehokasta toimintaa estävät tekijät. Arvovirtakuvauksen avulla voidaan lyhentää tuotannon läpimenoaika ja pienentää tuotantohukan määrää. [53] Arvovirtakuvausta tarjoavat useat laatukonsultointiin keskittyneet yritykset. Myös koulutuslaitokset, kuten Lahden ammattikorkeakoulu, tarjoavat Lean-ajatteluun pohjautuvia palveluja.

5.1.4 Materiaalivirta-analyysit

Materiaalivirta- ja ainevirta-analyysit (MFA/SFA) (material/substance flow analysis) ovat menetelmiä, joita käytetään erilaisten systeemisten materiaali- ja ainevirtojen sekä niiden määrien arviointiin. Tarkasteltava systeemi voi olla esimerkiksi maantieteellinen alue, teollisuuden ala tai tuotantoyksikkö. Menetelmässä määritetään systeemin panokset ja tuotokset sekä systeemin sisäiset virrat. Näiden perusteella voidaan laskea esimerkiksi tarkasteltavan alueen materiaalitase. Saatua tietoa voidaan hyödyntää esimerkiksi

aluekehityksessä, yritysten strategisessa johtamisessa sekä ympäristöjohtamisessa, valmistusprosessien kehittämisessä ja tuotekehityksessä. [54]

Materiaalivirta-analyysien tekemisessä voidaan hyödyntää myös erilaisia ohjelmia. Eräs ilmaisohjelma on STAN, joka perustuu itävaltalaiseen standardiin ÖNORM S 2096 (Material flow analysis – Application in waste management). [55] Materiaalivirta-analyysejä suorittavat esimerkiksi ympäristökonsultointiin erikoistuneet yritykset (esimerkiksi Envitecpolis Oy) ja myös jotkut tutkimuslaitokset.

5.1.5 Muut työkalut

Toiminnan materiaalitehokkuutta voidaan parantaa myös muilla työkaluilla, jotka on tarkoitettu yrityksen toiminnan tehokkuuden tai laadun parantamiseen. Tällaisia työkaluja ovat muun muassa Six Sigma/LEAN Six Sigma, WCO World Class Operations tai Supply Chain Optimization SCO.

5.2 Kierrätys- ja uusiointipalvelut

Materiaalitehokkuuden kannalta kestumuovien suurin etu on, että niitä voidaan uudelleen sulattaa ja muotoilla lämmön ja paineen avulla. Se tarkoittaa, että tuotannon kestumuovisivuvirta voidaan useimmissa tapauksissa kierrättää ja käyttää raaka-aineena joko saman tai jonkin muun tuotteen valmistusprosessissa. Yleensä sivuvirtamateriaali murskataan, rouhitaan tai granuloidaan raaka-aineen syötön helpottamiseksi. Kierrätysmateriaali käytetään usein sekoittamalla sitä neitseellisen raaka-aineen joukkoon. Ekstruusio- ja ruiskuvaluprosessin sivu- tai jätevirtoja ovat esimerkiksi valukanavat, reunanauhat sekä ramp-up-vaiheen tuotanto ja muu epäkurantti tavara. Uusiointipalvelu voidaan ostaa myös alihankkijoilta, jolloin uusioitu raaka-aine toimitetaan yleensä takaisin granulaattina. Jos tuotteen valmistuksessa on käytetty vain yhtä muovia, ja sivuvirta saadaan talteen puhtaana ja sekoittumattomana muiden materiaalien kanssa, sisäinen kierrätys on melko helppo ja yleisesti käytetty vaihtoehto. Joissain prosesseissa lähes kaikki materiaali voidaan kierrättää sisäisesti ilman jäte- tai hukkamateriaaleja. Sen sijaan monimateriaalisten tai –muovisten tuotteiden valmistusprosesseissa syntyvän hukan tai sivuvirtojen hyödyntäminen on useimmiten hyvin haastavaa. Esimerkiksi jos tuotteessa käytetään metallisia inserttejä, niiden poistaminen lisää kustannuksia merkittävästi tehden kierrätyksestä useimmiten liian kallista. Samoin kahdesta tai useammasta muovista koostuvan kerros- tai hybridirakenteisten tuotteiden kierrätys on haastavaa. Muovien erottelu toisistaan voi olla monimutkaista, kustannuksiltaan liian kallista tai mahdotonta. Sivuvirran hyödyntäminen sellaisenaan on myös vaikeaa koska eri muovit vaativat erilaiset prosessointiparametrit, kuten lämpötilan ja paineen. Esimerkiksi kun PE-LD:n sulatyöstölämpötilat voivat olla 160–180 °C, PA alkaa sulaa vasta yli 220 °C lämpötiloissa, mikä tekee niiden yhteisprosessoinnin käytännössä mahdottomaksi. Tyypillisiä hybridirakenteita ovat elintarvikepakkaamiseen tarkoitettut monikerroskalvot.

Suurin osa Suomessa uusioitavista muoveista, noin 80-90 %, on tuotannon sivuvirtoja. Tärkeimpiä uusioitavia muoveja ovat polyolefiinit PE ja PP. Noin puolet Suomessa käytettävästä kierrätysmuoveista uusioivat yritykset itse. Noin puolet yrityksistä käyttää erillistä, ulkoistettua kierrätys- ja uusiointipalvelua. Silloin kierrätysmateriaali useimmiten toimitetaan takaisin granuloituna eli pellettimuodossa, mikä helpottaa varsinkin raaka-aineen käsittelyä, syöttöä ja annostelua rouheeseen verrattuna. Kierrätystoimialan yritykset voivat myydä materiaalin takaisin lähtöyritykseen/syntypaikkaan tai myydä kokonaan toiseen yritykseen. Jos sivuvirta/jätämateriaali ei sovellu kierrätykseen, se päättyy nykyään useimmiten energiahyödyntämiseen muovien hyvän lämpöarvon takia. Muoviteollisuus voi hyödyntää tuotantojätettä useilla eri tavoilla, riippuen tarvittavista esikäsittelyistä sekä sivuvirta- tai jätämateriaalin lähteistä:

- suoraan omassa valmistusprosessissa ilman mitään ylimääräistä käsittelyä;
- omassa valmistusprosessissa itse suoritettuna ylimääräisen käsittelyn, kuten erottelun, murskauksen tai granuloinnin kautta;
- omassa valmistusprosessissa ulkopuolisen alihankitun käsittelyn kautta sisältäen yleensä murskauksen ja granuloinnin sekä tarvittaessa erottelun ja pesun;
- yrityksen muiden valmistusprosessien, tuotantolaitosten tai yritysten sivuvirtamateriaalien hyödyntäminen.

Viimeisessä vaihtoehdossa materiaali voidaan ostaa joko muovien kierrättäjältä tai suoraan toisesta yrityksestä. Muovijätteen ostaminen suoraan toisesta tuotantoyksiköstä ei ole kovin yleistä Suomessa. Sellaista yhteistyötä esiintyy lähinnä alueellisesti. Muovien kierrätyspalveluja tarjoavia yrityksiä ovat Merikarvialla sijaitseva L&T Muoviportti sekä Suomen Käyttömuovi Oy. Kierrätysraaka-aineita voi olla saatavissa myös joiltain raaka-ainetoimittajilta.

5.3 Tuotteet ja komponentit

Tuotteen resurssitehokkuuteen voidaan vaikuttaa merkittävästi tuotesuunnitteluvaiheessa. Ympäristömyötäisellä tuotesuunnittelulla pyritään pienentämään tuotteen aiheuttamia ympäristörasituksia liittyen sen koko elinkaareen. Ympäristövaikutukset koostuvat raaka-aineiden hankinnasta, valmistuksesta, kuljetuksesta, käytöstä sekä käyttövaiheen jälkeisistä vaikutuksista kattaen kierrätyksen, uudelleenkäytön, energiahyödyntämisen tai loppusijoituksen. Tuotesuunnitteluvaiheessa joudutaan kuitenkin aina tekemään kompromisseja, sillä tuotesuunnitteluvaiheessa myös useat muut asiat vaikuttavat suunnitteluprosessiin vaatimuksineen. Huomioonotettavia asioita ovat muun muassa laatu, standardit, lainsäädäntö, pakattavuus, varastointi, tuotanto ja käytettävät valmistusprosessit, materiaalit, suorituskyky, huollettavuus

jne. Resurssitehokkuuteen selkeästi vaikuttavia asioita ovat muun muassa tuotteen painon tai raaka-ainekäytön vähentäminen sekä pidempi käyttöikä, käytön määrän lisääminen ja käytettävyys. Jos tuote on päivitettävissä tai helposti huollettavissa esimerkiksi modulaarisuuden kautta, se usein lisää käytön määrää ja siten pienentää tuotekohtaisia ympäristörasituksia resurssitehokkuuden periaatteiden mukaisesti.

5.3.1 Elinkaaritarkastelut

Tuotteen elinkaaren aiheuttamia ympäristövaikutuksia voidaan arvioida elinkaariarvioinnin eli LCA:n (engl. life cycle assessment) avulla. Se koostuu neljästä päävaiheesta. Tutkimuksen tavoitteiden ja rajauksen jälkeen tehdään inventaarioanalyysi, jossa kerätään tutkimusaineisto. Vaikutusarvioinnissa määritetään ympäristövaikutukset eri vaikutusluokittain. Vaikutusluokkia ovat muun muassa ilmaston lämpeneminen, happamoituminen ja ekotoksisuus. Tulosten tulkintavaiheessa tehdään lopulliset johtopäätökset. Parhaimmillaan elinkaariarviointia voidaan käyttää vertailevassa tutkimuksessa, jossa verrataan esimerkiksi käytettävän raaka-aineen vaihdon tai prosessimuutoksen vaikutusta ympäristökuormitukseen. [56]

Elinkaariarvioinnin apuvälineinä voidaan käyttää erilaisia elinkaariarviointiin suunniteltuja ohjelmistoja. Niitä ovat esimerkiksi GaBi ja SimaPro. LCA-tutkimuksia tekevät Suomessa useat ympäristöalaan keskittyneet insinööritoimistot sekä monet tutkimuslaitokset, esimerkiksi VTT, Suomen Ympäristökeskus SYKE, Tampereen teknillinen yliopisto (TTY) ja Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

MIPS-analyysi (material input per service unit) on menetelmä, jolla voidaan arvioida, kuinka paljon tuote, palvelu tai eri toiminnot kuluttavat materiaaleja ja siten luonnonvaroja. Sitä voidaan käyttää myös tuotesuunnittelun apuvälineenä. Muita käytettyjä ympäristövaikutusten mittareita ovat muun muassa hiilijalanjälki ja ekologinen jalanjälki.

5.3.2 Testaus- ja laboratoriopalvelut

Useat tuotteen ominaisuudet sekä materiaaliominaisuudet vaikuttavat tuotteen resurssitehokkuuteen. Tuotteen laatu, käytettävyys, käyttöikä, valmistettavuus ja muut ominaisuudet ovat tekijöitä, joita voidaan parantaa tuotteiden ja materiaalien testaamisella. Muovien tai muovituotteiden testausta tehdään useista eri syistä. Usein halutaan ennustaa materiaalien käyttäytymistä ulkoisen kuormituksen alaisena tai tietyissä käyttöolosuhteissa tai tunnistaa ja vertailla eri materiaaleja. Muovituotteiden osalta ominaisuuksiin vaikuttavat materiaalin kemiallisen rakenteen lisäksi mm. valmistustapa, kappaleen geometria, kosteus, lämpötila, kuormitusnopeus, lisäaineet ja lujitteet.

Kansainväliset standardit on kehitetty, jotta testit olisivat ajasta, paikasta, laitteesta ja tekijästä riippumattomia. Tutkimuksessa ja tuotekehityksessä käytetään usein standardikoekappaleita. Tällöin kappaleiden

valmistus on edullista ja vertailu muualla saatuihin tuloksiin helppoa. On olemassa myös tuotekohtaisia testistandardeja tai yritysten kehittämiä omia tuotekohtaisia testausmenetelmiä, koska lopputuotteessa on usein monimutkaisemmat jännityskentät ja geometria kuin yksinkertaisessa koesauvassa. Muovien osalta tutkitaan useimmiten mekaanisia, kemiallisia ja termisiä ominaisuuksia. Testaukset voidaan jakaa myös sen mukaan, mihin tuotteen elinkaaren vaiheeseen testaukset kohdistuvat. Tuotekehitysvaiheen testaukset ovat yleensä materiaaliominaisuuksien vertailevaa testausta tukien materiaalin- ja prosessinvalintaa. Kaupallistamisvaiheessa pääpaino on tuotetestauksissa, ja silloin käytetään usein akkreditoitua laboratoriota, jotka voivat myöntää tuotesertifikaatteja. Tuotteen valmistuksen yhteydessä testausta käytetään tuotteiden tai prosessien laadunvalvontaan. Tuotteen ollessa markkinoilla joudutaan joskus tekemään reklamaatio- tutkimuksia, joiden avulla pyritään selvittämään tuotteen vikaantumisen aiheuttanut syy. Syy voi johtua materiaalista, prosessoinnista, käytöstä tai käyttöolosuhteista.

Yritysten resurssitehokkuutta tukevia Suomessa toimivia eri alueiden palveluntarjoajia on koottu taulukoon 2. Taulukon palveluntarjoajat ovat esimerkkejä ja vastaavia toimijoita on olemassa muitakin.

Taulukko 2. Esimerkkejä yritysten resurssitehokkuutta tukevista eri alueiden palveluntarjoajista Suomessa.

Organisaatio-tyyppi	Esimerkkejä palveluntarjoajista	Esimerkkejä palveluista	Lähde/lisätietoa
Valtion omistama	Motiva Oy Motiva Services Oy	Energia- ja materiaalitehokkuushankkeet ja –katselmukset	www.motiva.fi
	VTT	Prosessiteollisuuden ja valmistavan teollisuuden energiatehokkuuteen liittyvät palvelut; raaka-aineiden ja sivutuotteiden jalostus (prosessinkehityspalvelut); testauspalvelut	www.vtt.fi
	SYKE	Elinkaarianalyysit ja -tutkimus	www.syke.fi
Tutkimus- ja kehitysorganisaatiot	Muovipoli Oy	Testauspalvelut; materiaalikatselmukset; sivuvirtojen hyödyntäminen ja muovien kierrätys; räätälöidyt muovitekniikan koulutukset yrityksille	www.muovipoli.fi
	Elastopoli Oy	Luonnonmateriaalikomposiittien ja elastomeerien tutkimus, kehitys ja testaus	www.elastopoli.fi
Yliopistot, ammattikorkeakoulut ja muut oppilaitokset	TTY	Opetus ja koulutus sekä tutkimus, tuotekehitys ja asiantuntijapalvelut muovi- ja elastomeeritekniikassa	www.tut.fi
	Aalto	Tutkimus ja koulutus; Materiaalien testaus, karakterisointi	www.aalto.fi
	LUT	Tutkimus ja koulutus; Energiatehokkuus, LCA, LCCA	www.lut.fi
	LAMK	Muovien prosessointi, testaus ja analyysit; materiaali- ja energiatehokkaat ratkaisut (puu, muovi, tekstiilit); lean-koulutuspalvelut	www.lamk.fi
	MAMK	Materiaalikarakterisointi ja testaus, tutkimus- ja kehityshankkeet	www.mamk.fi
Teknologia-keskukset	KETEK	Tutkimus- ja kehityspalvelut; testaus- ja analyysipalvelut	ketek.fi
Konsultti-, palvelu- ja asiantuntijayritykset	Envitecpolis Oy	Materiaali- ja ainevirta-analyysit	www.envitecpolis.fi
	Calefa Oy	Ratkaisuja hukkalämmön talteenottoon & energiankäytön tehostamiseen	www.calefa.fi
	Acqua Plastica	Tuotekehitys	www.acquaplastica.fi
	Muovifakta Oy	Materiaalinvalinta	www.muovifakta.fi
	Polymerik Oy	Materiaalinvalinta	www.polymerik.fi
Kierrätyspalvelut	L&T Muoviportti	Muovien kierrätyspalvelut ja uusioraaka-aineet	www.lassila-tikanoja.fi/sivustot/lt-muoviportti/
	Suomen Käyttömuovi Oy	Muovien kierrätyspalvelut	www.kayttomuovi.fi

Muovien ja muovituotteiden testausta tarjoavat Suomessa Muovipoli Oy ja VTT sekä yliopistoista esimerkiksi Tampereen teknillinen yliopisto ja Aalto. Ammattikorkeakouluista erityisesti Lahden ammattikorkeakoululla on osaamista muovien testauksesta. Komposiittimateriaaleihin liittyvää testaus- ja analyysipalvelua on saatavilla KETEK Oy:stä sekä Mikpolis Oy:stä. Erityisesti elastomeerien testaukseen on keskittynyt Elastopoli Oy.

Lähteet

1. Teknologiateollisuus ry. Teknologiateollisuuden materiaalitehokkuusjulkaisu. Kilpailukykyä ja uutta liiketoimintaa materiaalitehokkuudesta. Helsinki, 2013.
2. Työ- ja elinkeinoministeriö. Valtioneuvoston strategia cleantech-liiketoiminnan edistämisestä. Toukokuu 2014. [WWW]. [viitattu 12.6.2014]. Saatavissa: http://www.tem.fi/files/39783/TEM_valtioneuvoston_strategia_cleantechliiketoiminnan_edistamisesta_06052014.pdf.
3. Allwood, J.M., Ashby, M.F., Gotowski, T.G. & Worrell, E. Material efficiency: A white paper. 2011, Resources, Conservation and Recycling 55 (2011), pp. 362-381.
4. Energy technology perspectives 2008: scenarios & strategies to 2050. Paris 2008, International Energy Agency. 642 p.
5. Giacone, E. & Mancò, S. Energy efficiency measurement in industrial processes, Energy 38(2012)1, pp. 331-345.
6. Measuring eco-efficiency. A guide to reporting company performance. Geneva, 2000, World Business Council for Sustainable Development.
7. Müller, K. & Sturm, A. Standardized eco-efficiency indicators-report 1: concept paper. Revision 1.05/January 2001. Basel 2001, Ellipson AG.
8. Erkko, S., Melanen, M. & Mickwitz, P. Eco-efficiency in the Finnish EMAS reports-a buzz word? Journal of Cleaner Production 13 (2005), pp. 799-813.
9. Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency. 2009, European Union. 430 p.

10. Heikkilä, I., Huumo, M, Siitonen, S., Seitsalo, P. & Hyytiä H. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT), Teollisuuden energiätehokkuus. Helsinki 2008, Suomen Ympäristökeskus. 91 p.
11. Materiaalitehokas toiminta säästää luontoa ja rahaa. Helsinki 20008, Elinkeinoelämän keskusliitto EK. 28 p.
12. Communication from the commissions to the Council and the European Parliament, Integrated Product Policy, Building on Environmental Life-Cycle Thinking. 2003, European Commission. 30 p.
13. EU Website. [Online] [Cited: 20 4 2012.] http://europa.eu/index_fi.htm.
14. Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products. 2009, European Union.
15. Vähemmästä enemmän ja paremmin, Kestävän kulutuksen ja tuotannon toimikunnan (KULTU) ehdotus kansalliseksi ohjelmaksi. Helsinki 2005, Ympäristöministeriö ja kauppa- ja teollisuusministeriö. 168 p. (in Finnish)
16. Kohti kierrätysyhteiskuntaa – Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2016. Helsinki 2008, Ympäristöministeriö. 54 p. (in Finnish)
17. Kansallinen luonnonvarastrategia, älykkäästi luonnon voimin. Helsinki 2009, Suomen itsenäisyyden juhlarahasto Sitra. 12 p. (in Finnish)
18. Kansallisen luonnonvarastrategian taustaraportti, luonnonvaroissa muutoksen mahdollisuus. Helsinki 2009, Suomen itsenäisyyden juhlarahasto Sitra. 56 p. (in Finnish)
19. Blinnikka., P. Materiaalitehokkuuden palvelukeskus, esiselvitys, alueelliset ympäristöjulkaisut nro 364. Tampere 2004, Pirkanmaan ympäristökeskus. (in Finnish)
20. Kaila, J. Materiaalitehokkuuden palvelukeskuksen liiketoiminta- ja toiminta-suunnitelmat sekä käynnistysohjelma. 2005, Kasui Oy. (in Finnish)

21. Työ- ja elinkeinoministeriö. Kestävää kasvua materiaalitehokkuudella. Työryhmän esitys kansalliseksi materiaalitehokkuusohjelmaksi. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. Konserni, 33/2013.

22. Motiva. Materiaalitehokkuuskatselmuksilla kustannussäästöjä ja ympäristöetuja. Helsinki, 2008. [WWW]. [viitattu 3.6.2014]. Saatavissa: http://motiva.fi/julkaisut/materiaalitehokkuus/materiaalitehokkuuskatselmuksilla_kustannussaastaja_ja_ymparistoetuja.1583.shtml

23. Lilja, R. & Saramäki, K. Materiaalien käytön tehokkuus ympäristölupamenettelyssä. Ympäristöministeriö, Helsinki, 2012

24. Penttinen, A. & Mäntynen, J. Työhön perehdyttäminen ja opastus - ennakoivaa työsuojelua. Työturvallisuuskeskus TTK, 2009.

25. Lahden ammattikorkeakoulu. Hyvä perehdytys -opas. Lahti, 2007.

26. Sefe. Suomen ekonomiliitto. Osaamisen kehittäminen [WWW]. [viitattu 22.5.2014]. Saatavissa: <http://www.sefe.fi/osaamisen-kehittaminen>.

27. Hyvä työ - pidempi työura. Teknologiateollisuuden työhyvinvointihanke. Osaamisen kehittäminen [WWW]. [viitattu 27.5.2014]. Saatavissa: <http://www.tyohyvinvointi.info/osaaminen-haluttuun/osaamisen-kehittaminen>.

28. Pfeifer, M. Materials Enabled Design. Burlington 2009, Butterworth-Heinemann. 306 p.

29. Ashby, M.F. Materials Selection in Mechanical Design, 2nd ed. Oxford 1999, Butterworth Heineman. 495 p.

30. Crawford, R.J. Plastics Engineering, 3rd ed. Oxford 1999, Butterworth-Heinemann. 434 p.

31. Harper, C.A. Handbook of Materials for Product Design. New York 2001, McCraw-Hill. 1000 p.

32. Van der Vegt, A.K. From Polymers to Plastics. Delft 2002, DUP Blue Print. 237 p.
33. Tangram Technology. Resource efficiency in plastics processing [WWW]. [viitattu 12.5.2014].
Saataavissa:
<http://www.pcn.org/Technical%20Notes%20%20Resource%20Efficiency%20in%20Plastics%20Processing.pdf>.
34. Euroopan Unioni. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2008/98/EY. Euroopan unionin virallinen lehti nro L 312, pp. 3-30, 2008.
35. Plastics Recyclers Europe. Strategy Paper: How to boost plastics recycling and increase resource efficiency? Bryssel, 2012.
36. Al-Salem, S., Lettieri, P. & Baeyens, J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. Waste Management vuosik. 29(10), p. 2625–2643, 2009.
37. Euroopan komissio. Vihreä kirja. Ympäristössä olevaa muovijätettä koskevasta eurooppalaisesta strategiasta. Bryssel, 2013.
38. Hopewell, J., Dvorak, R. & Kosior, E., Review. Plastics recycling: challenges and opportunities. Phil. Trans. R. Soc. B vuosik. 364(1526), pp. 2115-2126, 2009.
39. Hulse, S. Plastics Product Recycling: A Rapra Industry Analysis Report. Shrewsbury, Shropshire, UK: iSmithers Rapra Publishing, 2000. 130 p. Esikatseloversio.
40. Tolinski, M. Plastics and Sustainability: Towards a Peaceful Coexistence between Bio-based and Fossil Fuel-based Plastics. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. 296 p. Esikatseloversio.
41. Euroopan parlamentti. Euroopan parlamentin päätöslauselma 14. tammikuuta 2014 ympäristössä olevaa muovijätettä koskevasta eurooppalaisesta strategiasta. (2013/2113(INI)). 2014 [WWW]. [viitattu 3.6.2014]. Saataavissa: <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+TA+P7-TA-2014-0016+0+DOC+XML+V0//FI>.

42. Eskola, P. & Lempiäinen, R. Teolliset symbioosit - edistävät materiaalien resurssiviisasta hyödyntämistä ja tuovat uutta liiketoimintaa. Ympäristö ja Terveys -lehti, nro 6, 2013.
43. Wortberg, J. Resource and energy efficiency – a challenge for plastics technology. [WWW]. [viitattu 2.6.2014]. Saatavissa: http://www.konline.de/cipp/md_k/custom/pub/content,oid,20327/lang,2/ticket,g_u_e_s_t/~Resource_and_energy_efficiency_%E2%80%93_a_challenge_for_plastics_technology.html.
44. Kent, R. Energy Management in Plastics Processing [WWW]. [viitattu 3.6.2014]. Saatavissa: <http://www.tangram.co.uk/TIEnergy%20Management%20in%20Plastics%20Processing%20-%20BPF.pdf>.
45. Tamminen, V. & Nieminen, M. Hukkalämmön tehokas hyödyntäminen ja muuttaminen voitoksi. Calefa, 2014.
46. ABB. Mikä on taajuusmuuttaja? ABB 23.06.2008 [WWW]. [viitattu 16.6.2014]. Saatavissa: <http://www.abb.fi/cawp/db0003db002698/d5b664f5dd909412c1257291003ef7cc.aspx>.
47. Motiva Oy. [WWW]. [viitattu 16.6.2014]. Saatavissa: www.motiva.fi.
48. Fowler, J.W., Rose, O. Grand Challenges in Modeling and Simulation of Complex Manufacturing Systems, *Simulation* 80 (9) 2004, pp. 469-476.
49. Bharti, B.K. Recent methods for optimization of plastic injection molding process - A retrospective and literature review. *International Journal of Engineering Science and Technology* vuosik. 2(9), pp. 4540-4554, 2010.
50. Kistler. Systematic Process Parameter Optimization, 2011. [WWW]. [viitattu 28.5.2014]. Saatavissa: <http://www.stasa.de/documents/500-690e-07.11.pdf>.
51. Kallien, L. Optimization of the Injection Moulding Process for Thermoplasts With 3D Simulation. Aachen: Sigma Engineering GmbH.

52. Stanek, M., Manas, D., Manas M. & Suba, O. Optimization of Injection Molding Process. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation* vuosik. 5(5), pp. 413-421, 2011.
53. Abdulmalek, F. A. & Rajgopal, J. Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study. *International Journal of Production Economics* 107 (2007), pp. 223-236.
54. Bringezu, S. & Moriguchi, Y. Material flow analysis, pp. 79-90 in book Ayres, R.V. & Ayres L.W. *A Handbook of Industrial Ecology*. Edward Elgar, Cheltenham, UK, 2002. 680 p.
55. Cencic, O. & Rechberger, H. Material flow analysis with software STAN. *J. Environ. Eng. Manage.*, 18(1), 3-7 (2008).
56. Lundqvist, L., Leterrier, Y., Sunderland, P., Månson, J-A.E. *Life Cycle Engineering of Plastics: Technology, Economy and the Environment*. Eastbourne 2000, Elsevier. 206 p.