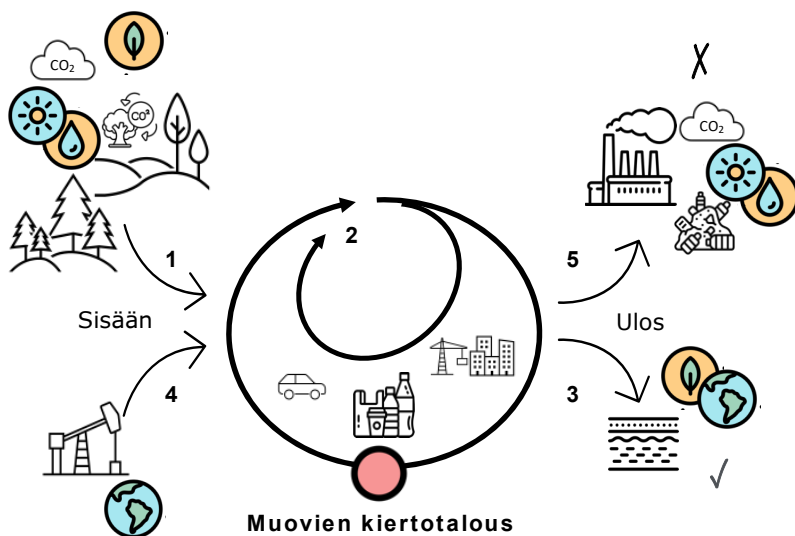


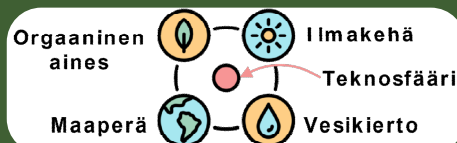
Uusien muoviratkaisujen yhdistelmät voivat jarruttaa ilmastomuutosta ja luoda hiilinielun

Haaste: Muoviteollisuuden nykyiset ratkaisut siirtävät hiiltä maaperästä ilmakehään ja siten kiihdyttävät ilmastomuutosta.



Tämä kuva on laadittu käyttäen kuvakkeita osoitteesta Flaticon.com.

Hiili kiertää erilaisissa luonnon ja ihmisen järjestelmissä



Ratkaisu tiiviisti: Hiilisiirto-malli yhdistää käytettävän hiilen raaka-ainelähteet ja havainnollistaa hiilen kiertoa erilaisissa luonnon ja ihmisen järjestelmissä. Samalla se auttaa osoittamaan, kuinka kiertotalous auttaa hidastamaan päästöjä, mutta kuinka kokonaisvaikutus voidaan määrittää ainoastaan määrittämällä järjestelmän sisään/ulos tasapainon kokonaisuutena.

Toimenpide-ehdotukset

Huomio tulee keskittää ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden muutoksiin.

- Hiilisiirto-mallin tukemien ratkaisujen tulee vähentää hiilen vapauttamista maaperästä ilmakehään (kuvassa 1...3), lisätä hiilen sitoutumista ilmakehästä maaperään (kuvassa 4...5) ja sitoa hiiltä muovin kiertotaloudessa mahdollisimman pitkäksi aikaa (kuvassa 2).
- Hiilisiirto-tarkastelulla voimme tunnistaa ilmastomuutosta jarruttavat ratkaisuyhdistelmät ja kuinka voimme muuntaa muoviteollisuuden hiilinieluksi.

Mikäli muovin raaka-aine on fossiilipohjainen, uudelleenhiilettäminen on tarpeen.

- Hiilisiirto-mallin näkökulmasta muovijätettä ei tule polttaa energiana.
- Uudelleenhiilettämisen avulla voidaan minimoida muoviteollisuuden vaikutus ilmastomuutokselle, mutta hyödyntää muoveja aiempaan tapaan.
- Tästä huolimatta ilman ilmakehästä hiiltä siirtäviä ratkaisuja muoviteollisuus on parhaimmillaankin ilmastomuutoksen kannalta neutraali (±).

Biopohjaiset muovit voivat kääntää muoviteollisuuden päästölähteestä hiilinieluksi.

- Tämä on mahdollista ValueBioMat-projektin kaltaisten hankkeiden avulla, joissa tutkitaan parhaita keinoja korvata fossiilisia raaka-aineita biopohjaisilla vaihtoehtoilla.
- Erilaiset biomuovit ja biokomposiitit voivat mahdollistaa uudenlaisia muovituotteita ja uusiutuvia raaka-ainelähteitä, mutta ennen kaikkea mahdollistavat muoviteollisuuden kääntämisen ilmastomuutoksen kannalta ongelmasta ratkaisuksi.
- Ilmakehästä hiiltä siirtävät ratkaisut ovat muoviteollisuudelle ainut keino jarruttaa ilmastomuutosta ja kehittää hiilinieluksi.

Miksi hiilisiirto-malli tarvitaan?

Muoviteollisuuden nykyiset ratkaisut siirtävät hiiltä maaperästä ilmakehään ja siten kiihdyttävät ilmastonmuutosta.

- Fossiilisista raaka-aineista valmistetut muovit kiihdyttävät ilmastonmuutosta vapauttamalla hiilidioksidia ilmakehään päätyessään elinkaarensa lopuksi poltto-aineeksi energiantuotantoon.
- Biomuovit ja biokomposiitit siirtävät hiiltä ilmakehästä muovituotteisiin.
- Muovien pitkä-aikainen käyttö, kierrätys, ja "uudelleenhiilettäminen" jarruttavat ilmastonmuutosta viivästyttämällä ja estämällä sitoutuneen hiilen palauttamista ilmakehään.
- ValueBioMat-projektissa kehitetty hiilisiirto-malli ohjaa muovituotteiden raaka-aineita koskevan tarkastelun ilmastonmuutosta jarruttaviin ja kiihdyttäviin ratkaisuihin.
- Hiilisiirto-malli kuvaa monimutkaisten ratkaisujen yhteisvaikutuksia yksinkertaisella tavalla ja keskittää huomion ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden muutoksiin.
- Hiilisiirto-mallin avulla voimme tunnistaa ilmastonmuutosta jarruttavat ratkaisuyhdistelmät ja kuinka voimme kääntää muoviteollisuuden päästölähteestä hiilinieluksi.

Esimerkki: Toimi näin

Jarruttava vai kiihdyttävä vaikutus?

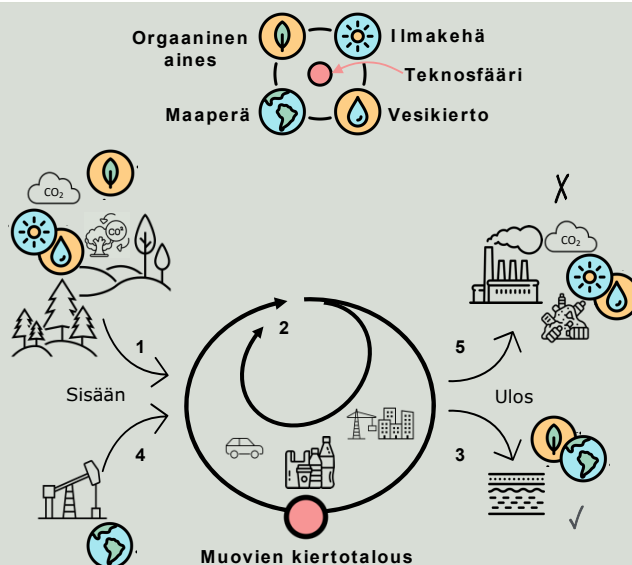
Uuden pakkausmateriaalivaihtoehdon vaikutus ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden osalta arvioidaan hiilisiirto-mallissa seuraavien näkökulmien kautta:

- Mitä tuotteeseen otetaan ilmakehästä (kuvassa kohta 1)? Esimerkiksi biomuovia voidaan valmistaa kasviperäisistä bioöljyistä tai muoviin sekoitetaan kasviperäisiä kuituja (biokomposiitti), jotka sitovat hiilidioksidia ilmakehästä.
- Mitä raaka-aineita tuotteeseen käytetään maaperästä (kuvassa kohta 4)? Esimerkiksi fossiiliset, ei kierrätetyt raaka-aineet.
- Miten tuote valmistetaan ja miten sitä käytetään (kuvassa kohta 2)? Kuinka pitkään sitä käytetään ja miten se luo arvoa käyttäjilleen? Voidaanko tuotetta käyttää useita kertoja uudelleen? Voidaanko tuotteen muovi kierrättää takaisin samaan käyttötarkoitukseen? Esimerkiksi pitkän käyttöiän sovellukset, jossa tuote käytetään uudelleen, sitovat hiiltä käytön ajan. Kemiallinen kierrätys mahdollistaa muovin raaka-aineiden uudelleenkäytön samaan sovellukseen.
- Mitä tuotteesta palautuu maaperään (kuvassa kohta 3)? Esimerkiksi biokomposiitti-muovista voidaan valmistaa biohiiltä (biochar), joka sitoo tehokkaasti hiiltä maaperään ja toimii kasvien kasvupohjana. Vaikka hiilisiirto-tarkastelussa onkin painotettu ilmakehän CO₂-pitoisuuden muutosta, muovien polttamisen sijaan myöskään niiden keräys kaatopaikalle ei ole ympäristön kannalta kestävä tai toivottava ratkaisu.
- Mitä tuotteesta palautuu ilmakehään (kuvassa kohta 5)? Esimerkiksi muovia poltettaessa siihen sitoutunut hiili vapautuu ilmakehään kasvattaen CO₂-pitoisuutta.
- Lopuksi arvioidaan mikä on materiaalivaihtoehdon systeemin osien summa. Lisääkö vai laskeeko se ilmakehän CO₂-pitoisuutta? Onko tämä vaihtoehto ilmastotavoitteiden kannalta jarruttava vai kiihdyttävä?

Hiilisiirto-malli

Hiilisiirto-malli ohjaa muovituotteiden raaka-aineisiin liittyvän tarkastelun ilmastonmuutosta jarruttaviin (kuvassa vihreällä, ✓) ja kiihdyttäviin (punaisella, X) ratkaisuihin. Jarruttavat ratkaisut (kuvassa ketju 1...2...3) sitovat hiiltä ilmakehästä tuotteeseen ja lopuksi turvallisesti maaperään tai pitkäaikaisvarastoon; esimerkiksi biopohjaisista raaka-aineista valmistettu muovi tai komposiitti, joka muutetaan elinkaarensa lopussa biohiileksi (näitä tutkitaan mm. ValueBioMat-projektissa, lue lisää <https://valuebiomat.fi>). Kiihdyttävät ratkaisut (kuvassa ketju 4...2...5) puolestaan ottavat hiiltä maaperästä ja vapauttavat sen ilmakehään; esimerkiksi fossiilisista raaka-aineista valmistettu muovi, joka hävitetään lopuksi polttamalla.

KUVA: Hiilisiirto-malli yhdistää käytettävän hiilen raaka-ainelähteet ja havainnollistaa hiilen kulkeutumista erilaisissa luonnon ja ihmisen järjestelmissä. Samalla se auttaa osoittamaan, kuin-ka kiertotalous auttaa hi-dastamaan päästöjä, mutta kuinka kokonais-vaikutus voidaan määrittää järjestelmän sisään/ulos tasapainon kokonaisuutena.



Tämä kuva on laadittu käyttäen kuvakkeita osoitteesta Flaticon.com.

Hiilisiirto-malli pyrkii kuvaamaan monimutkaisten ratkaisujen yhteisvaikutuksia mahdollisimman yksinkertaisesti ja havainnollisesti, mutta silti riittävän luotettavasti. Malli keskittää huomion ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden muutoksiin. Tästä syystä sitä voidaan hyödyntää monenlaisen valmistavan teollisuuden ympäristövaikutusten arviointiin. Ennen kaikkea hiilisiirto-malli havainnollistaa raaka-ainelähteiden roolin eri-alaisten arvoketjujen muodostumisen ja niiden ilmastovaikutusten taustalla.

Hiilisiirto-mallin avulla voidaan havainnollistaa, miten muoviteollisuuden nykyiset ratkaisut siirtävät hiiltä maaperästä ilmakehään ja kiihdyttävät ilmastonmuutosta (ks. kuva). Fossiilisista raaka-aineista valmistetut muovit kiihdyttävät ilmastonmuutosta. Tämä vaikutus syntyy muovien elinkaaren lopussa, kun ne poltetaan energiantuotannossa ja vapauttavat hiilidioksidia ilmakehään. Sen sijaan biomuovit ja biokomposiitit siirtävät hiiltä ilmakehästä muovituotteisiin, kun niihin käytettävä biopohjainen raaka-aine (esimerkiksi puu) sitoo kasvaessaan hiilidioksidia ilmakehästä itseensä. Tämän lisäksi muovituotteiden pitkä-aikainen käyttö, kierrätys (mukaan lukien kemiallinen kierrätys) ja uudelleen hiilettäminen jarruttavat ilmastonmuutosta viivästyttämällä ja estämällä sitoutuneen hiilen palauttamista ilmakehään. Seuraavaksi esittelemme hiilisiirto-mallia yksityiskohtaisemmin.

Hiilisiirto-mallin merkitys

Esitetty hiilisiirto-malli korostaa hiilen kulkeutumista erilaisissa luonnon tai ihmisen luomissa järjestelmissä (ks. kuva). Hiili voi sitoutua erilaisiin lokeroihin, eli kehiin: ilmakehä (engl. atmosphere), vesikierto (hydrosphere), maaperä (geosphere) ja orgaaninen aines, mm. kasvit ja eläimet (biosphere). Näiden lisäksi ihmiskunta on rakentanut ”tekносfäärin” (technosphere), joka on läheistä sukua neljälle muulle kehälle: se sisältää kaikki ihmisen rakentamat tuotteet ja esineet, joita nykyaikainen elämä hyödyntää (Suh & Bardow, 2022). Tämänkin tekstin tuottaminen ja levittäminen vaatii hiiltä, on sitten kyse sen paperisesta tai digitaalisesta kopiosta.

Ilmastomuutoksen jarruttamiseksi tulee suosia muoviteollisuuden ilmakehästä hiiltä vähentäviä ja maaperään turvallisesti hiiltä palauttavia vaihtoehtoja ja karsia kiihdyttäviä vaihtoehtoja. Näiden ratkaisuketjujen arvioinnissa on myös huomioitava tuotteiden elinkaarien toistojen ja pidentämisen jarruttava vaikutus (kohta 2). Hiilisiirto-mallin tarkastelun avulla voimme tunnistaa ilmastomuutosta jarruttavan ratkaisun tai raaka-ainelähteen elementit:

- Vähennetään fossiilisten raaka-aineiden käyttöä muoviteollisuudessa. Muoviteollisuus **kiihdyttää** ilmastomuutosta, mikäli muoveja tuotetaan fossiilisista raaka-aineista, jotka otetaan maaperästä (esim. raakaöljynä tai maakaasuna, kuvassa kohta 4) ja ne hävitetään polttamalla (kuvassa kohta 5).
- Pidennetään kiertotalouden keinoin tuotteen elinkaarta ja tehostetaan materiaalien uusiokäyttöä sekä kierrätettävyyttä (kuvassa kohta 2), jolloin muovi-tuotteisiin sitoutunut hiili on mahdollisimman pitkään arvoa tuottavassa käytössä sekä samalla pois ilmakehästä.
- Kartoitetaan vaihtoehtoisia raaka-aineita, joilla muoveja voidaan tuottaa fossiilisten raaka-aineiden sijaan biopohjaisista raaka-aineista. Erityisen lupaavia raaka-ainelähteitä ovat erilaiset biopohjaiset sivuvirrat, kuten paperintuotannosta ylijäävät biomassat. Tästä syystä ValueBioMat –projekti keskittyy muoveihin, joita voidaan valmistaa biopohjaisista raaka-aineista tai erilaisin biokomposiittirakentein (kuvassa kohta 1). Nämä ratkaisut vähentävät tarvetta fossiilisille muovien raaka-aineille, mutta samalla sitovat hiiltä ilmakehästä muovituotteisiin pitkäaikaiseen, arvoa luovaan käyttöön.
- Lisätään hiilen turvallista sitoutumista maaperään uudelleenhiilettämällä, esimerkiksi tuottamalla biokoksia (biocoke) tai biohiiltä (biochar) muovituotteista niiden elinkaaren lopussa (kuvassa kohta 3).
- Vähennetään muovin polttamista ja lisätään hiilidioksidin (CO₂) talteenottoa savukaasuista (kuvassa kohta 5).
- Siten ValueBioMat ratkaisut **jarruttavat** ilmastomuutosta siirtämällä hiiltä ilmakehästä pitkäikäiseen, arvoa luovaan käyttöön. Ideaaliratkaisussa nämä muovituotteet ”uudelleenhiiletetään” elinkaarensa lopuksi takaisin hiileksi, jota voidaan siirtää maaperään turvallisesti, joko kasvien käyttöön sopivana biohiilenä tai kokonaan pois kierrosta, jolloin hiili varastoidaan uudelleen maaperään. Tällä tavalla muoviteollisuus voidaan muuntaa päästölähteestä hiilinieluksi (ketju 1...2...3).

Päästölähteestä hiilinieluksi

Hiilisiirto-malli osoittaa, kuinka teknosfääri toimii tehokkaana hiilivarastona (kohta 2). Niin kauan kuin mitä tahansa tuotteita tai resursseja hyödynnetään, ne paitsi luovat arvoa käyttäjälleen, mutta samalla pitävät hiilen pois ilmakehästä. Kiertotalous ja sen erilaiset tavat – uusiokäyttö, kunnostus, ja kierrätys – ovat kaikki erinomaisia keinoja pidentää tätä kiertoa, jolloin hiili pysyy entistä pidempään arvoa luovassa toiminnassa.

Malli myös auttaa ymmärtämään, miksi biopohjaiset raaka-aineet ovat tärkeässä roolissa ilmastonmuutoksen hillitsemisessä. Ne mahdollistavat teknosfäärin valjastamisen hiilinieluksi, kun tuotteita valmistetaan hyödyntämällä uusiutuvia raaka-aineita (biosphere), jotka kasvavat sitoen hiiltä ilmasta ja vedestä (atmosphere & hydrosphere). Koska muovit syntyvät pitkistä hiiliketjuista, muoviteollisuus on erityisen potentiaalinen hiilivarasto teknosfäärissä. Vastaavasti, hiilisiirto-malli myös korostaa, että kaikista haitallisista vaihtoehdoista on valmistaa tuotteita ottamalla maaperään sitoutunutta hiiltä (geosphere) ja käytön jälkeen hävittää tuote polttamalla, jolloin hiili vapautuu ilmakehään (atmosphere). Kertakäyttöiset ja lyhytikäiset muovituotteet ovat erityisen suuri ongelma tästä näkökulmasta, sillä niiden polttaminen vapauttaa hiiltä ilmakehään.

Hyvällä suunnittelulla on mahdollista kääntää jopa kokonaisen teollisuudenalan rooli ilmastonmuutoksen vastaisessa taistelussa. Käytännössä tämä tarkoittaisi sitä, että esimerkiksi muoviteollisuutta voistaisiin ajatella päästölähteen sijaan hiilinieluna (de Oliveira et al., 2021; Ohs & Herrmann, 2023; Stegmann et al., 2022; Suh & Bardow, 2022). Näin kunnianhimoiselle tavoitteelle on muutama reunaehto:

- Fossiilisia raaka-aineita tulee korvata biopohjaisilla, kun se on mahdollista, huomioiden bioraaka-aineen tuottamiseen vaadittavat resurssit. Tällöin muovituotteisiin käytettävä hiili on peräisin ilmakehästä, jonka kasvit ovat sitoneet itseensä yhteyttämällä (Ohs & Herrmann, 2023).
- Koska tuotteiden valmistus vaatii työtä ja resursseja, pelkkä raaka-ainelähteen vaihto ei riitä. Siksi muovituotteiden elinkaarta on pyrittävä pidentämään kiertotalouden periaatteiden mukaisesti aina, kun se on kokonaisuutena arvioituna mielekästä. Tuotteiden valmistuksessa on suosittava uusiutuvaa energiaa (Stegmann et al., 2022; Zheng & Suh, 2019).
- Elinkaaren lopussa tuotteista ilmakehään vapautuvan hiilen (CO₂) määrä on minimoitava. Potentiaalisia keinoja tähän ovat uudelleenhiiletys eri muodoissaan, kuten biohiilen (Al-Rumaihi et al., 2022; Schmidt et al., 2019) tai biokoksin (Devasahayam et al., 2018) valmistus, sekä erilaiset polttolaitosten kaasujen talteenottojärjestelmät.

Toimenpide-ehdotukset

Hiilisiirto-malli kuvaa monimutkaisten ratkaisujen yhteisvaikutuksia yksinkertaisella tavalla ja keskittää huomion ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden muutoksiin.

- Mallin tukemien ratkaisujen tulee vähentää hiilen vapauttamista maaperästä ilmakehään (kuvassa 1...3), lisätä hiilen sitoutumista ilmakehästä maaperään (kuvassa 4...5) ja sitoa hiiltä muovin kiertotaloudessa mahdollisimman pitkäksi aikaa (kuvassa 2). Kestävyysmurroksen jouduttamiseksi tulee suosia hiilisiirto-mallin kannalta ilmakehästä hiiltä vähentäviä ja ilmastonmuutosta hidastavia vaihtoehtoja ja karsia kiihdyttäviä vaihtoehtoja.
- Hiilisiirto-tarkastelulla voimme tunnistaa ilmastonmuutosta jarruttavat ratkaisuyhdistelmät ja kuinka voimme muuntaa muoviteollisuuden hiilinieluksi.

Mikäli muovin raaka-aine on fossiilipohjainen, tulee sen elinkaaren lopussa huomioida tarkkaan mahdollisuudet uudelleenhiilettämiseksi.

- Hiilisiirto-mallin näkökulmasta muovijätettä ei tule polttaa energiana (vapauttaen ilmakehään hiilidioksidia), vaan se tulee käsitellä toisella tavoin. Ympäristön näkökulmasta ideaalitalanne olisi muuntaa muovijäte uudelleen hiileksi tavalla, joka sitoo käytetyn hiilen maaperään turvallisesti, esimerkiksi kasvien käyttöön sopivana.
- Uudelleenhiilettämisen avulla voidaan minimoida muoviteollisuuden vaikutus ilmastonmuutokselle, mutta hyödyntää muoveja aiempaan tapaan. On kuitenkin syytä huomata, että ilman ilmakehästä hiiltä siirtäviä ratkaisuja muoviteollisuus on parhaimmillaankin neutraali ($\pm$).

Kunnianhimoisempi tavoite päästöjen vähentämisen sijaan on muuttaa muoviteollisuus päästölähteestä hiilinieluksi.

- Tämä on mahdollista ValueBioMat-projektin kaltaisten hankkeiden avulla, joissa tutkitaan parhaita keinoja korvata fossiilisia raaka-aineita biopohjaisilla vaihtoehtoilla. Erilaiset biomuovit ja biokomposiitit voivat mahdollistaa uudenlaisia muovituotteita ja uusiutuvia raaka-aineiden lähteitä, mutta ennen kaikkea mahdollistavat muoviteollisuuden kääntämisen ilmastonmuutoksen kannalta ongelmasta ratkaisuksi. Ilmakehästä hiiltä siirtävät ratkaisut ovat muoviteollisuudelle ainut keino jarruttaa ilmastonmuutosta ja kehittyä hiilinieluksi.
- Muoviteollisuuden jarruttavan hiilisiirron mahdollistamiseksi tarvitaan uutta tutkimusta biopohjaisten muoviratkaisujen kehityksessä.

Työryhmä:

Esko Hakanen, Jan Holmström, Katri Valkokari, Kirsi Immonen, Teemu Mikola, Hannu Ilvesniemi, Jouni Partanen

Lähteet

Al-Rumaihi, A., Shahbaz, M., McKay, G., Mackey, H., & Al-Ansari, T. (2022). A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112715>

de Oliveira, C. C. N., Zotin, M. Z., Rochedo, P. R. R., & Szklo, A. (2021). Achieving negative emissions in plastics life cycles through the conversion of biomass feedstock. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15(2), 430–453. <https://doi.org/10.1002/bbb.2165>

Devasahayam, S., Raman, R. K., Chennakesavulu, K., & Bhattacharya, S. (2019). Plastics—villain or hero? Polymers and recycled polymers in mineral and metallurgical processing—a review. *Materials*, 12(4), 655. <https://doi.org/10.3390/ma12040655>

Schmidt, H. P., Anca-Couce, A., Hagemann, N., Werner, C., Gerten, D., Lucht, W., & Kammann, C. (2019). Pyrogenic carbon capture and storage. In *GCB Bioenergy* (Vol. 11, Issue 4, pp. 573–591). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12553>

Ohs, B., & Herrmann, S. (2023). The chemical industry as a carbon steward. *European Bioplastics Conference, Berlin*.

Qureshi, M. S., Oasmaa, A., Pihkola, H., Deviatkin, I., Tenhunen, A., Mannila, J., Minkkinen, H., Pohjakallio, M., & Laine-Ylijoki, J. (2020). Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 152, 104804. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104804>

Stegmann, P., Daioglou, V., Londo, M., van Vuuren, D. P., & Junginger, M. (2022). Plastic futures and their CO2 emissions. *Nature*, 612(7939), 272–276. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05422-5>

Suh, S., & Bardow, A. (2022). A plastic container for carbon emissions. *Nature*, 612, 214–215.

Zheng, J., & Suh, S. (2019). Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. In *Nature Climate Change* (Vol. 9, Issue 5, pp. 374–378). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0459-z>

Lue lisää tutkimuksesta osoitteessa valuebiomat.fi!

ValueBioMat on Suomen Akatemian yhteydessä toimivan Strategisen tutkimuksen neuvoston (STN) rahoittama projekti. Projektissa ratkotaan globaaleja materiaalivalintoihin liittyviä ongelmia ja tutkitaan keinoja korvata fossiilisia petrokemian ratkaisuja biopohjaisilla vaihtoehtoilta kestävyysmurroksen ratkaisemiseksi. Projektissa kehitetään ratkaisuja, jotka mahdollistavat biopohjaisten raaka-ainelähteiden laajamittaista käyttöä muoviteollisuudessa, ja hyödynnetään digitalisaation ja kiertotalouden periaatteita puhtaamman tulevaisuuden mahdollistamiseksi.

Jaribion, A., Dharmawardane, C., Siltalo, J., & Holmström, J. Impact of Bio-based Packaging on Supply Chain Complexity, 28th EurOMA Conference: Managing the “New Normal”: The Future of Operations and Supply Chain Management in Unprecedented Times.

Siltalo, J., & Ballardini, R. (2023). Promoting Systemic Collaboration for Sustainable Innovation through Intellectual Property Rights. *Journal of Co-operative Organization and Management*, 11(1), [100200].

Wolff, J., Jakubik, M., Siltalo, J., Wolff, L.-A., & Hakanen, E. (2023). Sustainability Transitions by Ecosystem Innovation. In S. O. Idowu & L. Zu (Eds.), *The Elgar Companion to Corporate Social Responsibility and the Sustainable Development Goals* (pp. 48–67). Edward Elgar Publishing.

Wiman, H., Siltalo, J., & Leinonen, A., (2023). Finding high-impact intervention points for plastic recycling using an exploratory stock-flow model. In: *Journal of Cleaner Production*. 395, 136396.

Ylén, J.-P., Valkokari, K., Immonen, K., Ballardini, R. & Holmström, J., (2023). Balancing knowledge protection and sharing as a means to boost sustainability-oriented innovation in plastics ecosystems. *Proceedings of XXXIV ISPIM Innovation Conference: Innovation and Circular Economy*.

Äkräs, L., Ballardini, R., Alen-Savikko, A. & Seppälä, J., (2022). Towards Sustainable and Circular Practices with Plastics: Exploring the Potential of Law and Governance Tools Based on Holistic and Harmonized Life Cycle Assessment.