

Männyn raaka-aineen VOC-päästöjen vähentämismenetelmät

LAB-ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK) Puutekniikan koulutusohjelma

2024

Ville Reinikainen

Tiivistelmä

Tekijä(t)	Julkaisun laji	Valmistumisaika
Ville Reinikainen	Opinnäytetyö, AMK	2024
	Sivumäärä	
	48	
Työn nimi		
Männyn raaka-aineen VOC-päästöjen vähentämismenetelmät		
Tutkinto ja koulutusala		
Insinööri, Puutekniikka (AMK)		
Toimeksiantajaorganisaatio (jos opinnäytetyöllä on toimeksiantaja)		
Metsä Wood		
Tiivistelmä		
<p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia männyn raaka-aineen VOC-päästöjen vähentämismenetelmiä sorvaavassa teollisuudessa. Tavoitteena oli selvittää teknologisia, operatiivisia ja innovatiivisia keinoja päästöjen vähentämiseksi. Toimeksiantajana toimi Metsä Wood. Työssä hyödynnettiin monia ammatillisia ja tutkimuksellisia lähteitä VOC-yhdisteiden lähteiden ja syntymisen ymmärtämiseksi. Työn tulokset osoittavat, että parhaita VOC-päästöjen vähentämismenetelmiä ovat haudonnan, kuivauksen ja puristuksen prosessien optimointi. Haudonnan lämpötilan nostaminen 70 °C lisäsi formaldehydin vapautumista männyn pintapuusta, ja kuivauksen sekä puristuksen lämpötilan nostaminen 180 °C vähensi VOC-päästöjä merkittävästi, jopa kymmenesosan nykypäivän raja-arvoista. Lisäksi mikroaalto- ja radiotaajuustekniikat vähensivät päästöjä 79–80 %, mikä tekee niistä lupaavia menetelmiä. Tuloksista ilmeni myös, että mikroaaltotekniikka on erityisen hyödyllinen, koska se ei vaikuta puun kosteuteen.</p>		
Asiasanat		
Haihtuvat Orgaaniset Yhdisteet, VOC, Mänty, Vaneri		

Abstract

Author(s)	Type of Publication	Published
Ville Reinikainen	Thesis, UAS	2024
	Number of Pages	
	48	
Title of Publication		
Methods of reducing VOC emissions of Pine raw material		
Degree, Field of Study		
Bachelor of Engineering, Wood technology (UAS)		
Organisation of the client (if the thesis work is commissioned by another party)		
Metsä Wood		
Abstract		
<p>The purpose of this thesis was to study methods for reducing VOC emissions from pine raw materials in the veneer industry. The aim was to identify technological, operational, and innovative solutions for reducing emissions. The project was commissioned by Metsä Wood. The study utilized various professional and research sources to understand the origins and formation of VOC compounds. The results demonstrate that the best methods for reducing VOC emissions include optimizing the processes of soaking, drying, and pressing. Raising the soaking temperature to 70 °C increased the release of formaldehyde from the sapwood of pine, while raising the drying and pressing temperatures to 180 °C significantly reduced VOC emissions, even by one tenth of the current limits. In addition, microwave and radiofrequency techniques reduced emissions by 79–80%, making them promising methods. The results also indicated that microwave technology is particularly beneficial, as it does not affect the moisture content of the wood.</p>		
Keywords		
Volatile Organic Compounds, VOC, Pine, Plywood		

Sisällys

1	Johdanto.....	1
1.1	Metsä Group	1
1.2	Metsä Wood	2
2	Havuvanerin ja LVL:n valmistus.....	3
2.1	Valmistusprosessi	3
2.2	Havuvanerin käyttökohteet	5
3	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC).....	8
3.1	VOC-yhdisteet.....	8
3.2	Tuotannon prosessit.....	10
3.3	Männyn kemiallinen koostumus ja ominaisuudet	11
3.4	Terveysvaikutukset.....	14
3.5	Ympäristövaikutukset	15
4	Näytteenkeräystekniikat.....	18
4.1	VOC-yhdisteiden analysointi sisäilmasta	18
4.2	Ilmasta keräävät menetelmät.....	18
4.3	Jatkuvatoimiset mittauslaitteet.....	20
5	Vähentämiskeinot metsäteollisuudessa	22
5.1	Teknologiset ratkaisut.....	22
5.2	Operatiiviset ratkaisut.....	27
5.3	Innovatiiviset ratkaisut	31
6	Kansalliset säädökset	33
6.1	Ohjeistukset ja suositukset	33
6.2	EU:n direktiivit ja määräykset	34
7	M1-luokitus	35
7.1	M1-tuotteen vaatimukset	35
7.2	M1-luokitus rakennustuotteelle	38
8	VOC-päästöjen analyysi sorvaavassa teollisuudessa	41
8.1	Päästöjen lähteet ja mekanismit	41
8.2	Vaihtelut prosessien välillä	41
8.3	Männyn vaikutus päästöihin verrattuna kuuseen tai koivuun	42
9	Yhteenveto	43
	Lähteet	45

1 Johdanto

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC=Volatile Organic Compounds) ja niiden vähennyskeinoja sorvaavassa teollisuudessa. Tutkimus perustuu kirjallisuuteen ja aiempiin tutkimuksiin, ja se keskittyy VOC-päästöjen syntyyn, lähteisiin sekä niiden vähentämiseen valmistusprosessin aikana ja lopputuotteessa. Tarkoituksena on löytää vanhoista ja uusista tutkimuksista mahdollisia keinoja VOC-Päästöjen vähentämiseen. Tutkimuksen tulokset voivat tarjota käytännön ratkaisuja teollisuudelle, auttaen kehittämään vähäpäästöisiä tuotantoprosesseja ja parantamaan tuotteiden ympäristöystävällisyyttä. Toimeksiantajana on Metsä Wood.

VOC-päästöjä syntyy teollisuudessa useissa kemiallisissa ja mekaanisissa työvaiheissa, ja ne aiheuttavat merkittäviä riskejä sekä ympäristölle että terveydelle. Työssä tarkastellaan kansallisia ja EU säädöksiä, kuten direktiivejä, jotka koskevat VOC-päästöjen hallintaa ja vähentämistä. Tutkimuksen tavoitteena on tarjota kattava kuva VOC-päästöjen vaikutuksista ja esitellä tehokkaita vähennysmenetelmiä, jotka parantavat sekä ympäristön tilaa, että edistää ihmisterveyttä.

1.1 Metsä Group

Metsä Group on maailmanlaajuisesti toimiva suomalainen metsäteollisuusyhtiö. Yhtiön liikevaihto oli vuonna 2023: 6,1MRD € ja se toimii 28 eri maassa. Tuotantolaitoksia yhtiöllä on 7 eri maassa. Työntekijöitä Metsä Groupilla on 9500 henkilöä. Omistajina Metsä Groupilla on 90 000 suomalaista metsän omistajaa. (Metsä Group a.) Metsä Groupin omistajajäseneksi Metsäliitto osuuskuntaan pääsee hakemaan, kun omistaa Suomessa vähintään 3 hehtaaria metsää (Metsä Group b).

Metsä Groupilla on viisi liiketoiminta-aluetta. Ensimmäinen on Metsä Forest, joka keskittyy puunhankintaan ja metsäpalveluihin. (Metsä Group c.) Toisena liiketoimintana on Metsä Wood, joka valmistaa puuviilutuotteita, kuten Kerto-LVL:ää, koivuvaneria ja havuvaneria. (Metsä Group d.) Kolmantena on Metsä Fibre, joka keskittyy sellun, sahatavaran ja muiden biotuotteiden valmistukseen. (Metsä Group.2024e). Neljäs alue on Metsä Board, joka on listattu Helsingin pörssiin ja valmistaa valkoisia Kraftlainer- ja barrierkartonkeja sekä tarjoilu- ja taivekartonkeja. (Metsä Group f). Viides liiketoiminta-alue on Metsä Tissue, joka valmistaa hygieniatuotteita, kuten pehmopapereita (mm. Serla ja Lambi) kuluttajille ja ammattilaiskäyttöön sekä tiivisapapereita. (Metsä Group g). Metsä Groupilla on myös innovaatioyhtiö Metsä Spring, joka sijoittaa startupeihin ja hankkeisiin, jotka kehittävät uusia ja vastuullisia käyttötapoja pohjoismaiselle puulle. Metsä Springin tunnetuin sijoitus on tällä hetkellä Woodio, joka valmistaa puukomposiitista altaita ja wc-istuimia. (Metsä Group h.)

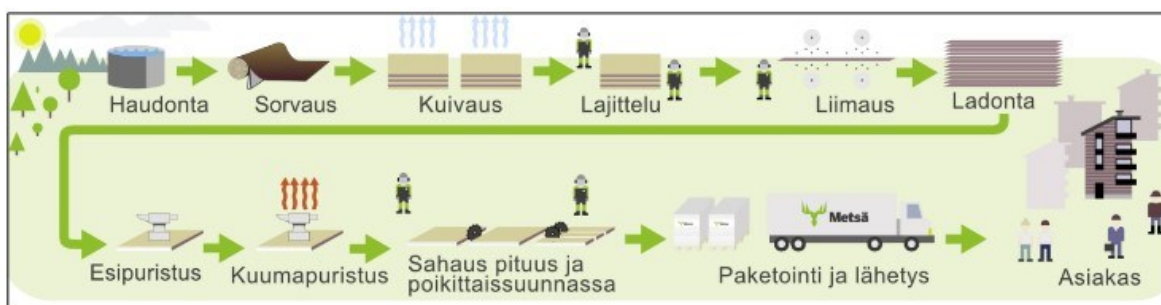
1.2 Metsä Wood

Metsä Wood on Metsä Groupin osa, joka jalostaa tukkeja korkealaatuisiksi vaneri- ja kertosuut tuotteiksi jakelu-, rakennus- ja teollisuusasiakkaiden tarpeisiin. Yhtiöllä on 1 550 työntekijää ja vuosittainen liikevaihto on 0,6 miljardia euroa. Metsä Woodilla on kahdeksan tuotantolaitosta, joista uusin laitos rakennetaan Äänekoskelle, missä valmistetaan Kerto LVL -viilupuuta. (Metsä Group d.)

2 Havuvanerin ja LVL:n valmistus

2.1 Valmistusprosessi

LVL:n samoin kuin vanerin valmistus on monivaiheinen prosessi, joka alkaa tukin käsitte-lystä ja päättyy valmiin levyaihion toimittamiseen asiakkaalle tai jatkojalostukseen. Vanerin ja LVL:n valmistus eroaa ladonnassa viilujen asettelun suhteen. (Liski 2018, 170, 182.) Alla olevassa kuviossa 1 esitetään valmistusprosessin eri työvaiheet.



Kuvio 1. Havuvanerin valmistusprosessi (muokattu Metsä Wood 2022b)

Vanerin valmistusprosessi alkaa tukin saapumisesta tehtaalle. Tukat varastoidaan joko varastointikentälle tai syötetään lajittelulinjalle, jossa ne mitataan ja lajitellaan niiden ominaisuuksien perusteella. Lajittelun jälkeen tukat siirretään varastoon tai hautomoaltaisiin, joissa niitä voidaan käsitellä myöhemmin, kun ne on katkaistu ja kuorittu (Kekki 2018, 46–48.)

Haudonta on tärkeä vaihe ennen sorvausta, sillä se pehmentää puuta, lisää puun elastisuutta ja parantaa viilujen laatua. Haudonta nostaa tukin sisälämpötilaa, mikä helpottaa viilun leikkaamista ja vähentää sorvaushalkeamien määrää. Tämä vähentää liiman ja loppuhionnan tarvetta. Lisäksi haudonta parantaa poikittaisvetolujuutta ja vähentää viilun halkeilua eri käsittelyvaiheissa (Kekki 2018, 49–50.)

Haudotut tukat kuoritaan tarkasti, jotta kuoreissa olevat hiekka ja kivet eivät vaurioittaisi sorvin teriä. Kuorinnan jälkeen tukat katkotaan sorvimittaan, esimerkiksi 1300 mm ja 2600 mm välillä (Kekki 2018, 52–54.)

Viilusorvissa tukat muokataan viiluiksi, joiden tavanomainen paksuus on yleensä 3,0–3,4 mm. Sorvaus optimoidaan tukkilaserilla ja automaattinen xy-keskittäjä asettaa tukin sorvausasentoon maksimoidakseen viilumattojen pituuden ja vähentääkseen irtokappaleiden määrää. Sorvauksen kapasiteetti riippuu puulajista ja tukin koosta. Sorvauksesta jää jäljelle

purilas, jonka halkaisija on havusorveilla 75–90 mm johtuen sorvin karojen paksuudesta. Sorvauksessa nuorpuusta saatu viilu on heikkolaatuista. (Kekki 2018, 55–60.)

Sorvatut viilut kuivataan joko telakuivauskoneessa tai verkkokuivauskoneessa. Viilut kulkevat telakuivauskoneessa tasaisesti eri vyöhykkeiden läpi, joissa lämpöä ja kosteutta hallitaan automaattisesti. LVL-tuotannossa viilujen tavoitekosteus on 3–5 %, kun taas havuvanerissa se on 6–8 %. Verkkokuivauskoneessa viilumatot kulkevat kerroksittain alas ja kuivuvat hallitusti. (Kekki 2018, 63–66.)

Viilut lajitellaan laatuvaatimusten mukaisesti kamerateknologian avulla, joka havaitsee viilussa esiintyvät viat, kuten oksat, halkeamat ja värivirheet. Viilut luokitellaan pintalaadun ja rakenteellisen käytön mukaan (Kekki 2018, 67.)

Ennen liimausta viiluja saumataan, jotta suuret viat poistuvat ja viilusaanto paranee. Saumaus tehdään liimalangan ja liiman avulla. Saumatun viilun pituus vastaa yleensä sorvatun tukin mitta, mutta leveydeltään viilut voidaan saumata mihin tahansa tarvittavaan mittaan. Myös pintaviilut voidaan saumata samoin kuin sisäviilut. Saumaamalla heikompilaatuisista viiluista voidaan valmistaa arvokkaita pintaviiluja, joista ajoittain on pulaa vaneritehtaissa (Kekki 2018, 71–72.)

Viilun jalostuksen ja lajittelun jälkeen seuraa ladonta ja liimaus. Prosessissa kerrokset ladotaan ristikkäin eri suuntiin tuottamaan vakautta, kun taas LVL:ssä viilut asetetaan samansuuntaisesti, mikä maksimoi vetolujuuden. Ladonnassa yhdistetään pintaviilut sekä pitkät että lyhyet sisäviilut vaneriksi. Ristikkäinen rakenne tarkoittaa, että viilut asetetaan syynsuuntaansa nähden ristikkäin. Havuvanerissa pintaviilu on yleensä pitkittäin. (Kekki 2018, 73.)

Ristikkäinen rakenne ja vaatimusten mukainen liimaus ovat vanerin lujuusominaisuuksien tärkeimmät tekijät, ja ne varmistavat tasaiset vetovoima-, taivutus-, puristus- ja jäykkyysarvot. Vanerin kerrosluku (ply) alkaa kolmesta kerroksesta, jolloin levyn nimellispaksuus on 9 mm. Levyn paksuus voi olla enintään 30 mm, jolloin se koostuu 10 kerroksesta viiluja. (Kekki 2018, 80.)

Liima levitetään viilulle pääsääntöisesti joko telalevityksenä, verholevityksenä tai juovalevityksenä. Perinteisin menetelmä on telalevitys, jossa liima levitetään molemmilta puolilta viilua, kun taas muut menetelmät levittävät liiman vain yhdeltä puolelta. Telalevityksen etuna on pieni tilantarve ja edullinen hankintahinta. Telalevityksessä liiman levitysmäärä on noin 155–200 g/m². (Kekki 2018, 82.)

Ladonnassa vanerin rakenne muodostuu viilujen määrän, laadun ja koon perusteella. Viilujen kosteuden on oltava oikea liimauksen onnistumiseksi. Viilut järjestetään ladonta-

asemalle siten, että pintalaadut ja sisäviilut lajitellaan erikseen. Ladonnassa on tärkeää, että viilut asetetaan oikein ohjaavan kovan reunan ja kovan kulman mukaisesti. Näin varmistetaan viilujen oikea kohdistuminen ja oikaiseminen puristuksessa ja sahausessa, jossa kovaa reunaa käytetään levyjen kohdistamiseen. Liiman reaktioaika asettaa ladontajalle tarkan ylärajan ja ladontapino on siirrettävä esipuristimeen viimeistään puolen tunnin kuluttua ladonnasta. Vanerin ladonta voidaan järjestää monella eri tavalla. Puoliautomaattisessa ladonta-asemassa ladonnasta huolehtii yksi tai kaksi työntekijää. Kapasiteettivaatimusten kasvaessa käytetään automaattisia ladontalinjoja, joissa viilujen syöttö tapahtuu alipaineisilla imukuppitarttujilla tai roboteilla. (Kekki 2018, 84.)

Esipuristuksessa liimattuja viilukerroksia puristetaan ilman lämpöä parantamaan liiman tartuntaa. Kuumapuristuksessa levyaihiot liimataan yhteen korkealla paineella ja lämmöllä, ja puristusaika vaihtelee liiman tyyppin ja levyn paksuuden mukaan. Ureaformaldehydiliima ja formaldehydiliima vaativat vähintään 100 °C lämpötilan kovettuakseen. Fenoliliimoilla varustetuille vanereille käytetään puristuslämpötiloja, jotka vaihtelevat 125–170 °C, kun taas urealiimoille käytetään 100–125 °C lämpötiloja. Havuvanerilla puristusaine on 10–15 bar. Puristusaika riippuu levyn paksuudesta. Fenoliliimalla puristusaika koostuu perusajasta, joka on 2 tai 3 minuuttia, sekä puolesta minuutista jokaista levyn paksuusmilliä kohti. Urealiimalla puristusaika on vähän lyhyempi. Puristusaine saadaan aikaan hydraulisyntereillä. (Kekki 2018, 86.)

Kuumapuristuksen jälkeen levyt sahataan määrämittaan ja pintaviat korjataan kitkaamalla. Tämän jälkeen levyt hiotaan valmiiksi tuotteiksi, pakataan ja toimitetaan asiakkaille (Kekki 2018, 90, 93.)

2.2 Havuvanerin käyttökohteet

Vaneria käytetään maailmanlaajuisesti rakentamisessa. Materiaalia käytetään juuri sen jäykkyys ja lujuusominaisuuksien vuoksi rakentamisessa. Rakentamisryhmät voidaan jakaa kahteen pääosa-alueeseen: puurakentaminen ja betonirakentaminen. (Tarvainen 2018, 149.)

Puurakentamisessa käytetään yleisesti pinnoittamatonta havuvaneria, koska se on kustannustehokas, kevyt ja helposti käsiteltävä. Vaneri on monikäyttöistä ja tarjoaa kestävästä rakenteesta, erityisesti lattiakäytössä. Tasalaatuinen ja kestävä levy on erinomainen valinta kohteisiin, joissa vaaditaan pitkää käyttöikää ja suurta lujuutta. (Tarvainen 2018, 149.)

Vaneri on helposti asennettava ja soveltuu hyvin ulkoseinien sisärakenteisiin, tuulensuojalevyksi ja väliseinien levytykseen. Katon kantavissa alusrakenteissa käytetään yleisesti havuvaneria. Vanerilevy on erinomainen valinta aluskatteen kiinnitysalustaksi sen

tasaisuuden ja lujuuden ansiosta. Vaneri jäykistää kattorakenteita paremmin kuin perinteinen ponttilaudoitus. (Tarvainen 2018, 150.)

Vaneria voidaan käyttää myös ulkoverhouksessa maalauspinnoitekalvolla päällystettynä. Tällöin levyt on osattava asentaa ja suojata käyttökohteissa mahdolliselta säärasitukselta. Vaneri on tässäkin tapauksessa helppo asentaa ja sen pinnat ovat valmiita maalattavaksi. Levyt voidaan valmistaa asiakkaan vaatimuksien ja piirustusten mukaisesti, mikä helpottaa ja nopeuttaa asennusta. Ulkokäyttökohteissa vaneria on huollettava säännöllisesti. (Tarvainen 2018, 149–150.)

Havuvaneria käytetään lisäksi valmistalo ja moduulirakentamisessa. Havuvaneria käytetään yleisesti maatilarakentamisessa. Maatilarakentamisessa käytetään erilaisia käsiteltyjä ja pinnoitettuja levyjä seinä ja kattolevyinä. Pinnoitetut levyt ovat helppo puhdistaa ja ne kestävät kulutusta. Maatalousrakentamiseen on saatavilla pintakyllästettyä vaneria, joka pienentää huomattavasti homehtumisriskiä. (Tarvainen 2018, 151.)

Liikuntapaikkarakentamisessa käytetään yleisesti paljon vaneria. Urheiluhallien seinät, katon ja katsomoiden lattiat ja penkit ovat usein vaneria. Infrarakentamisessa vaneria käytetään useissa käyttökohteissa kuten, kävelysilloissa, rampeissa, laitureissa ja lastaussilloissa. Näissä kohteissa usein tarvitaan hyvää kulutuksenkestoa, lujuutta, keveyttä, sääolosuhteiden kestoa sekä korjausmahdollisuutta. (Tarvainen 2018, 151–152.)

Havuvaneria käytetään betonirakentamisessa tietyissä kohteissa. Havuvaneria käytetään MDO (Medium Density Overlay) pinnoitetuissa levyissä yleisesti, joissa pinnoite auttaa peittämään karkean pintaviilun ja antaa betoniin valussa mattapintaisen jäljen. Betonivaluissa käytettäviltä levyiltä vaaditaan hyvää alkali- ja kosteudenkestoa. Levyn reunat suojataan tehtaalla huolellisesti kosteudenkestävällä maalilla. Holvivaluissa, joissa paine ei ole yhtä suuri kuin seinävaluissa, voidaan käyttää sekä sekavaneria että havuvaneria. Näissä valuissa voidaan käyttää ohuempaa pinnoitetta, esimerkiksi 120 g/m², kun taas yleisesti valuissa käytetään vakiopinnoitteena 220 g/m². Levyjen paksuus on näissäkin kohteissa 18 tai 21 mm paksua vaneria. (Tarvainen 2018, 152.)

Havuvaneria käytetään myös linja-autojen korirakenteissa riippuen siitä millaisia teknisiä ominaisuuksia vanerilta vaaditaan. Vaneria käytetään laajasti huonekalujen valmistuksessa ympäri maailmaa. Huonekaluissa vanerin etuja on sen helppo työstettävyys, pinnan vaaleus ja keveys. Vaneri on myös ympäristöystävällinen ja kaunis materiaali. Havuvaneria käytetään huonekalujen rungoissa. (Tarvainen 2018, 156–157.)

Muita käyttökohteita ovat pakkaukset, kuormalavat ja lavakaulukset. Keveyden ja iskunkestävyyden lisäksi vanerit ovat kierrätettäviä. Pakkaus-, kuormalava ja lavakaulusratkaisuissa

vanerit toimitetaan yleensä määrämittaan sahattuna ja tämän vuoksi levyiltä vaaditaan tarkkaa mittatoleranssia. Vaneripakkaukset voidaan räätälöidä eri käyttötarkoituksia varten esimerkiksi kokoontaitettavia pakkauksia käytetään lentorahdeissa niiden keveyden vuoksi. Havuvaneri on kevyt materiaali, joka ei merkittävästi lisää pakkauksen painoa, joten sen käyttö on tärkeää silloin, kun pakkauksen paino on olennaista. Pitkäaikaiseen käyttöön tarkoitettut pakkaukset voidaan maalata tai käsitellä asiakkaan visuaalisen ilmeen mukaan. Kierrätettävät lavat sopivat niin sisäiseen kuin ulkoiseen logistiikkaan. Lavankaulukset ovat monikäyttöisiä pakkausratkaisuja, koska ne voidaan taittaa kokoon paluukuljetuksen ajaksi, mikä säästää tilaa. Rakennustyömaa-aidoissa, opasteissa ja mainostauluissa käytetään yleisesti vaneria. Maalattu ja reunasuojattu levy on sopiva ulkokäytössä. (Tarvainen 2018, 158.)

3 Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC)

3.1 VOC-yhdisteet

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet ovat kemikaaleja, joilla on korkea höyrynpaine ja huono vesiliukoisuus. Monet VOC-yhdisteet ovat teollisesti tuotettuja ja niitä käytetään esimerkiksi maalien, lääkkeiden ja kylmäaineiden valmistuksessa. Näitä yhdisteitä löytyy usein öljypolttoaineista, hydraulinesteistä, maalien ohenteista sekä kuivapesuaineista. VOC-yhdisteet ovat yleisiä pohjaveden saastuttajia. (EPA.)

Lisäksi VOC-päästöjä syntyy tulisijoista palamisessa, teollisuuden prosesseissa ja liikenteessä. VOC-yhdisteet ovat orgaanisia yhdisteitä, joiden höyrynpaine on yli 0,01 kilopascalia 273,15 K eli 0 °C lämpötilassa. (Ympäristö.fi).

ISO 16000-6 -standardin mukaan VOCit voidaan jakaa kolmeen luokkaan, erittäin haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VVOC= Very Volatile Organic Compounds), haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC) ja puolihaihtuvat orgaaniset yhdisteet (SVOC= Semi Volatile Organic Compounds). (Työterveyslaitos a).

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC) pääsevät ilmaan kaasumaisina tietyistä kiinteistä aineista tai nesteistä. Nämä yhdisteet sisältävät useita kemikaaleja, joista osa voi aiheuttaa terveyshaittoja sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä. Monien VOC-yhdisteiden pitoisuudet ovat usein sisätiloissa huomattavasti korkeampia jopa kymmenkertaisia verrattuna ulkoilmaan. VOC-yhdisteitä vapautuu tuhansista eri tuotteista. Esimerkkeinä voidaan mainita seuraavat tuoteryhmät: maalit ja lakat; maalinpoistoaineet; puhdistusaineet; torjunta-aineet; rakennusmateriaalit ja huonekalut, toimistolaitteet, kuten kopiokoneet ja tulostimet; korjausnesteet; itsejäljentyvä kopiopaperi; sekä taide- ja askartelutarvikkeet; kuten liimat, kestävät tussit ja valokuvaukseen liittyvät kemikaalit. (EPA.)

Alifaattiset hiilivedyt ovat bentseenirenkaattomia yhdisteitä, jotka voivat olla suoraketjuisia, haarautuneita tai rengasrakenteisia. Ne jaotellaan sidosten perusteella alkaaneihin (yksisidoksiset), alkeeneihin (kaksisidoksiset) ja alkyyneihin (kolmesidoksiset). (Työterveyslaitos a.)

Aromaattiset hiilivedyt koostuvat tasomaisesta bentseenirenkaasta, jossa hiilisidosten elektronit ovat jakautuneet tasaisesti renkaan yli. Bentseeni, ksyleeni ja tolueni, joita käytetään liuottimina, ovat yleisiä liikenteen päästöissä. (Työterveyslaitos a).

Isopreeni on terpeenin rakenneosana. Terpeenit ovat laaja hiilivetyryhmä, jonka alkuperä on kasveissa. Terpeenejä haihtuu hedelmistä, puista ja yrteistä. Sisäilmassa esiintyy usein

limoneenia hajuvesistä ja elintarvikkeista sekä α -pineenia havupuista. Puista haihtuu myös muita yhdisteitä kuin terpeenejä. (Työterveyslaitos a.)

Alkoholit luokitellaan orgaanisiksi yhdisteiksi, joissa hydroksyyli-ryhmä on sitoutunut tyydyttäneeseen hiiliatomiin. Polyvalentti alkoholi sisältää useita hydroksyyli-ryhmiä, mutta ei koskaan samassa hiiliatomissa. Sisäilmaan voi haihtua alkoholeja eri materiaaleista ja tuotteista, kuten etanolia, 2-metyyli-2-propanolia ja 2-propanolia pesu- ja puhdistusaineista sekä 1-butanolia ja 2-etyyli-1-heksanolia liimoista ja PVC-tuotteista. 1,2-propaanidioli (propeeniglykoli) on yleinen kaksiarvoinen alkoholi, jota vapautuu rakennusmateriaaleista, pesuaineista, kosmetiikasta ja elintarvikkeista. (Työterveyslaitos a.)

Fenolit luokitellaan orgaanisiksi yhdisteiksi, joissa bentseenirengas on sitoutunut yhteen tai useampaan hydroksyyli-ryhmään. Fenolilla on tunnistettava, kemikaalimainen tuoksu, ja sitä voi vapautua muovista, luonnonkorkista ja sähkölaitteista. (Työterveyslaitos a.)

Alkoholi- ja fenolieetterit, eli glykolieetterit, ovat orgaanisia yhdisteitä, joissa happiatomi yhdistää kaksi tyydyttynyttä hiiliatomia. Näitä yhdisteitä esiintyy usein sisäilmassa, ja niiden lähteitä ovat erityisesti rakennusmateriaalit sekä pesu- ja puhdistusaineet. (Työterveyslaitos a.)

Aldehydit ovat orgaanisia yhdisteitä, joissa on terminaalinen karbonyyli-ryhmä (-CHO). Aldehydejä haihtuu luonnonmateriaaleista, hajusteista ja elintarvikkeiden aromiaineista. Formaldehydi (metanaali) ja asetaldehydi (etanaali) luokitellaan erittäin haihtuviksi yhdisteiksi (VOC), joita vapautuu palamisprosessissa sekä puupohjaisista rakennusmateriaaleista, kalusteista, tekstiileistä ja kosmetiikkatuotteista. Heksanaali ja nonaali haihtuvat usein puumateriaaleista ja luonnonmateriaaleista, kun taas bentsaldehydi, jolla on mantelinen tuoksu, on yleinen hajusteissa ja aromiaineissa. (Työterveyslaitos a.)

Ketonit ovat orgaanisia yhdisteitä, joissa karbonyyli-ryhmä sijaitsee hiiliketjun keskellä. Yleisin ketoni on asetoni, joka on liuotin ja kuuluu erittäin haihtuviin yhdisteisiin (VOC). Asetonia haihtuu rakennusmateriaaleista, ihmisen toiminnasta ja ihmisestä itsestään. (Työterveyslaitos a.)

Orgaaniset hapot ovat yleensä karboksyylihappoja, joissa on karboksyyli-ryhmä (-COOH). Luonnonmateriaaleista, kuten puusta ja pellavaöljystä, haihtuu orgaanisia happoja. Etikka-happo kuuluu erittäin haihtuviin yhdisteisiin (VOC) ja sitä voi vapautua rakennusmateriaaleista, pesuaineista ja elintarvikkeista. Sisäilmassa esiintyy myös muita orgaanisia happoja, kuten propaanihappoa ja heksaanihappoa. (Työterveyslaitos a.)

Esterit muodostuvat, kun alkoholi ja karboksyylihappo reagoivat, vettä vapauttaen. Esterit esiintyvät yleisesti sisäilmassa, ja niitä voi vapautua elintarvikkeista ja ihmisen toiminnan

seurauksena. Esimerkiksi (2,2,4-trimetyyli-1,3-pentaanidiolidi-isobutyraatti = TXIB) on PVC-materiaaleissa hyödynnetty pehmitin, joka voi haihtua näistä tuotteista (Työterveyslaitos a).

Orgaaniset piiyhdisteet ovat pii-happi-runkoisia polymeerejä, joissa piiatomit on yhdistetty hiilivetyryhmiin. Ne ovat yleisiä sisäilmassa ja niitä käytetään kosmetiikassa, pesuaineissa, tekstiilien käsittelyssä ja tiivistysmassoissa. Yleisin piiyhdiste sisäilmassa on dekametyyli-syklopentasiloksaani. (Työterveyslaitos a.)

Halogenoidut hiilivedyt, joissa hiilivetyatomit on korvattu kloorilla, fluorilla tai bromilla, ovat teollisesti valmistettuja yhdisteitä. Fluorivetyjä (HFC-yhdisteet) ja kloorifluorivetyjä (CFC-yhdisteet) käytetään kylmäaineina, tetrakloorieteenä kuivapesussa, ja 1,4-diklooribentseeniä ilmanraikastimissa. Nämä yhdisteet kuuluvat sekä VVOC- että VOC-kategorioihin. Torjunta-aineet (kuten DDT ja lindaani), palonestoaineet (polybromatut bifenyylit), puunsuoja-aineet (kloorifenolit) ja PCB-yhdisteet kuuluvat SVOC-alueeseen. Suomessa ja Euroopassa useiden halogenoitujen hiilivetyjen käyttöä on rajoitettu tai kielletty myrkyllisyyden vuoksi. Ennen vuotta 2000 käytetyt kloorifenolit voivat hajota kloorianisoleiksi, jotka ovat haihtuvia ja helposti havaittavia ilmassa. (Työterveyslaitos a.)

PVC (eli Polyvinyylikloridi) -materiaaleissa käytettiin aiemmin ftalaatteja pehmittiminä, mutta nykyään hyödynnetään disykloheksaanihapon johdannaisia tai tereftaalihapon estereitä. Sekä ftalaatit että niiden vaihtoehtoiset yhdisteet ovat rakenteellisesti estereitä. (Työterveyslaitos a.)

PAH-yhdisteet (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) ovat polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä, jotka koostuvat useista bentseenirenkaista. Ne kuuluvat usein puoli haihtuviin orgaanisiin yhdisteisiin (SVOC = Semi Volatile Compounds) tai hiukkasmaisiin orgaanisiin yhdisteisiin (POM = Organic Compounds Associated with Particulate Matter). Yleisin haihtuva PAH-yhdiste on naftaliini, jolla on tunnusomainen haju. Sisäilmassa voi esiintyä PAH-yhdisteitä jotka ovat peräisin rakennusmateriaaleista, kuten kivihiilitervaa sisältävistä vanhoista kosteuseristeistä, epätäydellisen palamisen seurauksena liikenteestä, puun ja kynttilöiden poltosta sekä ruoanlaitosta. (Työterveyslaitos a.)

3.2 Tuotannon prosessit

Du et al. (2024) Toteavat tutkimuksessa *The Emission Characteristics of VOCs and Environmental Health Risk Assessment in the Plywood Manufacturing Industry*, että vanerivalmistusteollisuuden VOC-päästöjen ymmärtäminen on edelleen rajallista ja päästökäytäntöihin keskittyviä tutkimuksia on vähän. Valmistustekniikoiden kehittyessä ja standardoitumisen myötä tuotantoprosessit ja raaka-aineet ovat samankaltaisia eri yrityksissä. VOC-päästöjen

kannalta kriittisiä prosessivaiheita ovat erityisesti liimapäällystys ja kuumapuristus, jotka tuottavat merkittävän osan päästöistä. (Du W, Xie H, Li J, Guan X, Li M, Wang H, Wang X, Zhang X, Zang Q. 2024.)

Adamová, Hradecký ja Pánek (2020) artikkelissa Volatile Organic Compounds (VOCs) from Wood and Wood-Based Panels: Methods for Evaluation, Potential Health Risks, and Mitigation todetaan, että puupohjaisten levytuotteiden teollisuudessa VOC-päästöt alkavat jo metsistä ja jatkuvat aina sisätiloihin asti. Päästöjä syntyy, kun puukuituja, -säleitä tai -viiluja liimataan erilaisilla kemikaaleilla ja lisäaineilla. (Adamová T, Hradecký J, Pánek M. 2020).

3.3 Männyn kemiallinen koostumus ja ominaisuudet

Puun makroskooppinen rakenne koostuu pitkänomaisista soluista, jotka pääasiassa suuntautuvat varren pituussuunnassa. Solut ovat yhteydessä toisiinsa huokosten kautta, jotka ovat pieniä aukkoja solujen välillä. Näiden solujen muoto ja toiminta vaihtelevat, ja ne tarjoavat puulle tarvittavan lujuuden, kuljettavat nestettä ja varastoivat ravinteita. (Sjöström 1993, 1.) Alla näytetään kuva 4-vuotiaan männyn makroskooppisesta rakenteesta.



Kuva 1. Osa nelivuotiaasta männyn varresta (Sjöström 1993, 2)

Kuvassa 1 näkyy puun makroskooppinen rakenne sellaisena kuin se näkyy paljaalla silmällä. Keskellä sijaitseva ydin on havaittavissa tummana raitana varren tai oksien keskellä.

Se edustaa ensimmäisenä kasvuvuotena muodostuneita kudoksia. Ksyleemi tai puu on järjestäytynyt samankaltaisiin vuosirenkaiisiin vuosittain, ja se sisältää myös säteitä vaaka-suuntaisissa riveissä. Nämä säteet ulottuvat ulkokuoresta joko sisäpuolella ensisijaisiin säteisiin tai vuosirenkaaseen, eli toissijaisiin säteisiin. Jotkut havupuut sisältävät hartsikanavia. Sisäosa puusta koostuu yleensä tummasta sydänpuusta. Ulompi osa puusta on pintapuuta, joka on väriltään vaaleampaa ja johtaa veden juurista puun lehtiin. Erittäin ohut kerros, joka sijaitsee elävien solujen (Ksyleemi) ja sisemmän kuoren (Nila) välissä on kambiaalinen vyöhyke. Säteinen kasvu ja solujakautuminen tapahtuu tällä alueella. (Sjöström 1993, 2.)

Puu kasvaa solujen jakautumisen kautta. Kasvujakson pituus riippuu pitkälti ilmastosta, mutta monin paikoin Pohjois-Amerikassa ja Skandinaviassa kasvu tapahtuu toukokuusta syyskuun alkuun ja on voimakkainta keväällä. Iso osa soluista kehittyy erilaisiksi pysyviksi soluiksi ja vain harvat säilyvät kasvavina jakautumiskykyisinä soluina. Puun kasvu on aina jatkuvaa, vaikka se hidastuukin ajan kuluessa. Pitkittäinen kasvu tapahtuu alkukauden aikana ja etenee varren, oksien ja juurien kärjessä. (Sjöström 1993, 2-3.)

Kambiaalinen vyöhyke koostuu useista soluriveistä, joilla kaikilla on kyky jakautua. Jakautuessaan alkusolu tuottaa uuden alku- ja ksyleemimosolun, joka puolestaan synnyttää kaksi tytärsolua; kukin jälkimmäisistä pystyy jakautumaan edelleen. Sisäpuolella olevaa ksyleemiä kohti muodostuu enemmän soluja kuin ulkopuolella olevaa nilaa kohti; nilansolut jakautuvat harvemmin kuin ksyleemisolut. Näistä syistä puut sisältävät aina paljon enemmän puuta kuin kuorta. (Sjöström 1993, 3.)

Kun solu jakautuu, se kehittää ensin solulevyn, joka sisältää runsaasti pektiiniainetta. Kumpikin kahdesta uudesta solusta erottuu myöhemmin ohuella, venyvällä ensisijaisella soluseinällä, joka koostuu selluloosasta, hemiselluloosasta, pektiinistä ja proteiinista. Seuraavassa vaiheessa solu laajenee lopulliseen kokoonsa, jonka jälkeen alkaa muodostua toissijainen soluseinä. Tässä vaiheessa soluseinä koostuu selluloosasta ja hemiselluloosasta. Lignifikaatio on prosessi, jossa soluseinässä oleva pektiini ja selluloosa korvautuvat ligniinillä. Lignifikaatio alkaa, kun toissijainen soluseinä on muodostumassa. (Sjöström 1993, 4.)

Toimintojensa perusteella solut voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään: johtavat solut, tukisolut ja varastosolut. Johtavat ja tukevat solut ovat kuolleita soluja, joiden onteloissa on vettä tai ilmaa. Varastosolut kuljettavat ja varastoivat ravinteita. Varastosolut ovat ohutseinäisiä soluja, jotka toimivat niin kauan kuin ne pysyvät nilassa. Veden kulkeutuminen puussa on mahdollista huokosten ansiosta. Huokokset ovat syvennyksiä toissijaisessa soluseinässä, jotka sijaitsevat vierekkäisten solujen välillä. (Sjöström 1993, 5-6.)

Selluloosa on puun pääainesosa. Puun kuiva-aineesta on selluloosaa noin 40-45 %, joka sijaitsee pääasiassa toissijaisessa soluseinässä. Selluloosa on homopolysakkaridi, joka koostuu β -D-glukopyranoosiyksiköistä, jotka ovat toisiinsa sitoutuneet (1 \rightarrow 4) -glykosididoksilla. Selluloosamolekyylit ovat täysin lineaarisia ja niillä on voimakas taipumus muodostaa molekyyliden sisäisiä ja molekyyliden välisiä vetysidoksia. Kuiturakenteensa ja vahvojen vetysidosten seurauksena selluloosalla on korkea vetolujuus ja se ei liukene useimpiin liuottimiin. Selluloosan fysikaalinen ja kemiallinen käyttäytyminen eroaa täysin tärkkelyksen omasta, mikä osoittaa selvästi stereokemiallisten ominaisuuksien ainutlaatuisen vaikutuksen. Kuten selluloosa, tärkkelyksen amyloosikomponentti koostuu (1 \rightarrow 4) -sidoksesta D-glukopyranoosiyksiköistä, mutta tärkkelyksessä nämä yksiköt ovat α -anomeerejä. Jokaisessa selluloosaketjussa on kaksi vetysidosta. Ensimmäinen muodostuu vierekkäisten glukosimolekyyliden välillä, kun happiatomi O₆ yhdistyy glukosijäämän hydroksyyliin O₂H, ja toinen vetysidos muodostuu renkaassa olevan hapen ja glukosimolekyylin hydroksyyliin O₃H välille. (Sjöström 1993, 54-55.)

Hemiselluloosien uskottiin alun perin olevan selluloosan biosynteesin välituotteita. Nykyään tiedetään kuitenkin, että hemiselluloosat kuuluvat heterogeenisten polysakkaridien ryhmään, jotka muodostuvat biosynteettisesti eri reittejä pitkin kuin selluloosa. Kuten selluloosa, useimmat hemiselluloosat toimivat tukimateriaalina soluseinissä. Hemiselluloosat hydrolysoituvat suhteellisen helposti hapoilla monomeerikomponenteiksi, jotka sisältävät D-glukoosia, D-mannosaa, D-galaktoosaa, D-ksyloosia, L-arabinoksia sekä pieniä määriä L-ramnoksia. Lisäksi niihin kuuluu D-glukuronihappoa, 4-O-metyylid-glukuronihappoa ja D-galaktouronihappoa. Useimpien hemiselluloosien polymeroitumisaste on vain 200. Jotkut puupolysakkaridit ovat laajasti haarautuneita ja liukenevat helposti veteen. Hemiselluloosien määrä puun kuivapainosta on yleensä 20-30 %. (Sjöström 1993, 63.)

Havupuu sisältää ligniiniä 26-32 % puun kuivapainosta. Ligniinit ovat fenyylipropaaniyksiköiden polymeerejä. Ligniinien tärkeimmät rakenteelliset elementit ovat suurelta osin selvitetty eristettyjen ligniinivalmisteiden, kuten jauhetun puun ligniinin, yksityiskohtaisten tutkimusten tuloksena käyttämällä erityisiä hajoamistekniikoita, jotka perustuvat hapetukseen, pelkistykseen tai hydrolyysiin happamissa ja emäksisissä olosuhteissa. (Sjöström 1993, 71-73.)

Uuteaineet ovat puun komponentteja, jotka liukenevat neutraaleihin orgaanisiin liuottimiin tai veteen, mutta ne yleensä muodostavat vain pienen osan puusta. Uuteaineet sisältävät erittäin suuren määrän yksittäisiä yhdisteitä, jotka voivat olla joko rasvaliukoisia tai vesiliukoisia. Näitä yhdisteitä voidaan pitää ei-rakenteellisina puuaineksina, jotka koostuvat lähes täysin solujen ulkopuolisista ja matalamolekyylipainoisista yhdisteistä. Männyn

sydänpuu sisältää yleensä huomattavasti enemmän uuteaineita kuin pintapuu. Esimerkiksi hartsihapot sijaitsevat hartsikanavissa, kun taas rasvat ja vahat ovat sädeparenkyymisoluuissa. Fenoliuutteita on pääasiassa sydänpuussa ja kuoressa. Uuteainepitoisuus on yleensä alle 10 %, mutta se voi vaihdella aina 40 %:iin puun kuivapainosta. Uuteaineet ovat arvokas raaka-aine orgaanisten kemikaalien valmistuksessa, ja niillä on tärkeä rooli sellun- ja paperinvalmistusprosesseissa. Männyssä puuhartsi on hallitseva hartsityyppi. Terpenoidit johdetaan muodollisesti isopreeniyksiköistä, ja siksi niitä kutsutaan joskus isoprenoideiksi. Historiallisesti terpeenin nimi annettiin hiilivedyille, jotka havaittiin tärpättiöljyssä. Nykyään terpeenit tunnetaan suurena hiilivetyryhmänä, joka koostuu isopreeniyksiköistä (C₅H₈). Niiden vastaavat johdannaiset, joissa on hydroksyyli-, karbonyyli-, ja karboksyyli-funktioita eivät ole hiilivetyjä. (Sjöström 1993, 90-92.)

3.4 Terveysvaikutukset

Erilaisia terpeenejä, kuten α -pineeniä, β -pineeniä ja heksaalia, pidetään silmiä ärsyttävinä. Dekanaali ja nonanaali ärsyttävät erityisesti sekä silmiä että ihoa, furfuraali ärsyttää sekä silmiä että ihoa. Lisäksi α -pineeni voi olla haitallista hengitettynä tai joutuessaan kosketuksiin ihon kanssa. (Adamová T, Hradecký J, Pánek M. 2020.)

Haihtuvat orgaaniset aineet ovat yksi tärkeimmistä mahdollisista myrkyistä, jotka voivat vaikuttaa sisäilman laatuun. VOC-yhdisteillä ei ole yleisiä terveyteen perustuvia ohjearvoja Euroopassa eikä Yhdistyneessä kuningaskunnassa. Chemicals in Europe residences – Part I: A review of emissions, concentrations and health effects of volatile organic compounds (VOCs) tutkimuksessa oli tarkoitus saada näyttö siitä mitä VOC-yhdisteitä eurooppalaisissa asunnoissa oli, sekä niiden pitoisuudet ja terveysvaikutukset. Tutkimuksessa tunnistettiin 65 yksittäistä VOC-yhdistettä. Näistä 14 kemikaalia oli aromaattisia hiilivetyjä, 9 alkaanihiilivetyjä, 8 aldehydejä, 5 alifaattiset hiilivetyjä, 6 terpeenejä, 4 kloorattuja hiilivetyjä, 3 glykoleja ja glykoli eettereitä ja 2 esteerejä. Hengityselinten terveyteen yhdistettiin 8 aromaattista hiilivetyä, 7 alkaanihiilivetyä ja 6 aldehydiä. Tunnistetuista 65 VOC-yhdisteestä 52 oli peräisin rakennusmateriaaleista, kuten tiilistä, puutuotteista, liimoista ja lattiamateriaaleista. Lisäksi 41 yhdistettä oli lähtöisin kulutustuotteista, kuten sähköisistä ja palavista ilmanraikastimista sekä deodoranteista. (Halios C, Landeg-Cox C, Lowther S, Middleton A, Marczyklo T, Dimitroulopoulou S 2022.)

Vanerin tuotannossa syntyy itsessään VOC-yhdisteitä. Liimoista ja lisäaineista vapautuu tuotantoprosessin aikana, kuten kuivauksen ja kuumapuristuksen yhteydessä, huomattava määrä VOC-yhdisteitä. Nämä aineet eivät aiheuta ainoastaan sisäilman saastumista vaan myös sisäilman laadun heikkenemisen ja vakavia terveysriskejä. Aromaattiset hiilivedyt, jotka imeytyvät ja kerääntyvät ihmiseen, voivat häiritä verenmuodostusjärjestelmää ja

johtaa sairauksiin, kuten leukemiaan. VOC-päästöt voivat aiheuttaa silmien, nenän ja kurkun ärsytystä sekä pahoinvointia, päänsärkyä ja koordinaatio-ongelmia. Altistuminen VOC-yhdisteiden haitallisille vaikutuksille voi aiheuttaa merkittäviä vaurioita elintärkeille elimille, kuten maksalle, munuaisille ja keskushermostolle. (Mengting G, Yongli Z, Yifanzi Z, Jintian G, Qin Z. 2023.)

Fenoliformaldehydihartseja (PF) käytetään laajasti vanerin, OSB-levyn (Oriented Strand Board eli suunnattu suurlastulevy), lastulevyn ja MDF-levyn (Medium Density Fiberboard eli puolikova kuitulevy) valmistuksessa niiden erinomaisen tartuntalujuuden, säänkestävyyden ja vedenkestävyyden vuoksi. Formaldehydi ja muut VOC-päästöt, jotka heikentävät merkittävästi sisäilman laatua, ovat merkittävä ongelma näissä puutuotteissa. Kansainvälinen syöväntutkimuslaitos IARC on luokitellut formaldehydin ryhmään 1 syöpää aiheuttavana ihmisille. Vaikka myös fenoli aiheuttaa terveysriskejä, sen päästöihin PF-puuliimoissa ei ole kiinnitetty yhtä paljon huomiota. Fenoli on IARC luokituksessa ryhmässä 3 (ei luokiteltu syöpää aiheuttavaksi ihmisille), mutta se voi silti aiheuttaa myrkyllisyyttä, joka ilmenee terveys- ja lisääntymisongelmina, mukaan lukien riski sikiön kehitysvammoihin tai raskauden keskeytykseen. (Jia L, Chu J, Li J, Ren J, Huang P, Li D. 2020.)

PAH-yhdisteet ovat laajimmin levinnyt ja merkittävä syöpää aiheuttava ryhmä, jota esiintyy ihmisen elinympäristössä. Joitakin niistä, kuten bentsoopyreenia, pidetään yhtenä vahvimista kemiallisista todennäköisesti syöpää aiheuttavista aineista. PAH-yhdisteet voivat lisäksi aiheuttaa muoto-, fysiologia- ja kehityshäiriöitä koe-eläimissä, lisätä allergisia immuunivasteita ihmisillä jopa alhaisilla pitoisuuksilla ja voivat yhdessä muiden ilmassa olevien myrkkujen kanssa aiheuttaa haitallisia terveysvaikutuksia. (Christensen 2014, 223.)

3.5 Ympäristövaikutukset

Characteristics and environmental and health impacts of volatile organic compounds in furniture manufacturing with different coating types in the Pearl River Delta. Journal of Cleaner Production tutkimuksessa todetaan haihtuvien orgaanisten yhdisteiden olevan keskeisiä tekijöitä alailmakehän otsonin O₃ ja sekundääristen orgaanisten aerosolien (Secondary Organic Aerosols = SOA) muodostumisessa. Ne vaikuttavat merkittävästi valokemialliseen savusumuun, joka on ilman saasteilmiö ja heikentävät siten ilmanlaatua. (Liu Y, Zeng C, Wang M, Shao X, Yao Y, Wang G, Li Y, Hou M, Fan L, Ye D. 2023.)

Suuri määrä VOC-päästöjä voi saastuttaa ympäristön ja vaarantaa ihmisten terveyden. Siksi VOC-päästöjen hallinta on erittäin tärkeää ympäristön saastumisen vähentämiseksi, ilmanlaadun parantamiseksi ja ihmisten terveyden suojelemiseksi. (Liu Y et al. 2023.)

Tutkimuksessa tarkasteltiin kahdeksaa tyypillistä huonekalujen valmistusyritystä, joissa käytettiin viittä eri pintakäsittelytyyppiä (liuotin, liuotin-UV, vesipohjainen, vesipohjainen UV ja jauhemaalit). Tutkimuksessa arvioitiin myös matalan VOC-pitoisuuden pintakäsittelyjen ympäristöhyötyjä vertaamalla liuotinpintoitteiden korvaamista vesipohjaisilla, vesipohjaisilla UV-pohjaisilla ja jauhepinnoitteilla. (Liu Y et al. 2023.)

Tulokset osoittavat, että eri pintakäsittelytyyppien VOC-pitoisuudet vaihtelevat merkittävästi. Liuotinpohjaiset pinnoitteet tuottavat korkeimmat VOC-pitoisuudet, kun taas vesipohjaiset ja jauhepinnoitteet ovat vähemmän saastuttavia. VOC-päästöt olivat hyvin johdonmukaisia keskenään. Vesipohjaisten pinnoitteiden käyttö tarjoaa merkittäviä ympäristöhyötyjä. (Liu Y et al. 2023.)

Eryistä huolta ovat herättäneet yhdisteet, kuten bentseeni, tolueeni, etyylibentseeni ja ksyleenit. Nämä yhdisteet ovat haitallisia terveydelle ja niitä löytyy usein suhteellisen korkeina pitoisuuksina ilmasta, vedestä ja maaperästä. Bentseeni, tolueeni, etyylibentseeni ja ksyleeniyhdisteet voivat aiheuttaa vakavia terveysongelmia, kuten syöpää, hermostohäiriöitä ja hengityselinten sairauksia. Siksi niiden esiintyminen ympäristössä on vakava huolenaihe. (Christensen 2014, 221.)

Öljy tuotteiden laajan käytön seurauksena öljykomponentteja ja liuottimia esiintyy usein ilmassa ja vedessä, erityisesti paikoissa lähellä öljynjalostamoita ja huoltoasemia sekä kaupunkialueilla. Päästyään pohjaveteen ne muodostavat LNAPL:n (light non-aqueous phase liquid) joka ei liukene veteen ja joka kelluu pohjaveden pinnalla. Klooratut metaanit, etaanit ja eteenit ovat liuottimia, joita käytetään laajalti erilaisiin teollisiin tarkoituksiin. Klooratut metaanit, etaanit ja eteenit ovat liuottimia, joita käytetään laajalti teollisissa tarkoituksissa. Esimerkiksi trikloroetyleenin (TCE) ja 1,1,1-trikloroetaani käytetään metalliosien rasvanpoistossa, kun taas perkloorietyleenin (PCE) toimii pääasiassa liuottimena vaatteiden kuivapesussa. Tetrakloorimetaani (hiilitetrakloridi) on käytössä jäähdytysaineena ja palonsammuttimissa, sekä kloorifluorihilivetyjen (CFC) tuotannossa. Dikloorimetaani (metyleenikloridi) on liuotin monissa kemiallisissa prosesseissa, ja kloorietyleenin (vinyylidikloridi) sekä 1,1-dikloorietyleenin ovat tärkeitä polymeerien, kuten polyvinyylidikloridin (PVC), valmistuksessa. Nämä liuottimet ovat vettä tiheämpiä ja muodostavat merkittävän osan tiheistä ei-vesipohjaisista nesteistä (DNAPL), joita löytyy Yhdysvaltojen pohjavesikerroksista. (Christensen 2014, 223.)

PAH-yhdisteitä syntyy lähes kaiken orgaanisen aineen palamisesta. PAH-molekyylit sisältävät vain hiiltä ja vetyä, ja niissä on vähintään kaksi fuusioitunutta aromaattista rengasta. Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto on määrittänyt kuusitoista yksittäistä PAH-yhdistettä päästöaineeksi. Monet tutkimukset ovat osoittaneet PAH-yhdisteiden esiintyvän kaikkialla

ympäristössä. Ympäristön PAH-yhdisteiden lähteet ovat: energiatuotanto, jossa käytetään fossiilisia polttoaineita; teolliset prosessit, kuten teräksen valmistus ja asfaltin valmistus; polttomoottoristen kulkuvälineiden pakokaasut; jätteiden teollinen poltto ja avopoltto; metsäpalot ja tulivuorenpurkaukset; kotitalouksien takanpoltto ja ruuanlaitto. Tupakoitsijoiden kotona pääasiallinen PAH-yhdisteiden lähde oli tupakan poltto. (Christensen 2014, 223.)

4 Näytteenkeräystekniikat

4.1 VOC-yhdisteiden analysointi sisäilmasta

Haihtuvia orgaanisia aineita voidaan analysoida ilmasta keräävillä menetelmillä sekä jatkuvatoimisilla mittauslaitteilla. Ilmasta keräävillä menetelmillä hankitut näytteet analysoidaan laboratoriossa. Jatkuvatoiminen mittauslaite näyttää tietokoneelta reaaliajassa ilmasta analysoidut tulokset. Yleisin sisäilman kemiallinen analyysi, joka koskee VOC-yhdisteiden tutkimista, perustuu standardiin ISO 16000-6. (Työterveyslaitos a.)

Sisäilmasta kerätyt ja analysoidut haihtuvat orgaaniset yhdisteet voidaan tunnistaa eri menetelmillä, riippuen siitä, mitä yhdisteitä halutaan tutkia. Näytteenotossa käytetty absorbentti ei kerää kaikkia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, joita esiintyy sisäilmassa. Tämän vuoksi joillekin yhdisteille on omat mittaus- ja analysointimenetelmänsä, jotta tuloksista saadaan luotettavampia kuin VOC-päästömittauksilla. Yleisimmin näytteet kerätään pumpun avulla, mikä yksinkertaistaa näytteenottoa ja siihen liittyvien tekijöiden arviointia. Joskus näytteiden pitoisuuksia halutaan kerätä pidemmältä aikaväliltä, jolloin keräys tapahtuu passiivisesti diffuusion avulla. Tällöin näytteenotto kestää formaldehydin ja aldehydien osalta vuorokaudesta viikkoon ja VOC-yhdisteiden osalta 2-4 viikkoa. (Työterveyslaitos a.)

VOC-mittausanalyysillä määritetään hahtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuutta (TVOC = Total Volatile Organic Compounds) ja määritetään sekä tunnistetaan vähintään kaksi kolmasosaa TVOC-yhdisteistä ja tärkeimmät TVOC-alueen ulkopuoliset yhdisteet. Standardissa ISO 16000-6 määritetään yhdisteiden n-heksadekaanin ja n-heksaanin summa-aktiivisuus, ottaen huomioon molemmat yhdisteet. Tolueenin eli tolueeniekvivalentin avulla lasketaan TVOC. Laskiessa TVOC kiinnitetään myös huomiota yksittäisiin yhdisteisiin kuten niiden laatuun ja määrään. Puhtaiden vertailuaineiden avulla määritetään ja tunnistetaan yksittäiset yhdisteet mahdollisuuksien mukaan. Jos yhdisteelle tai ryhmälle ei ole olemassa puhtaan aineen vertailuainetta, tapahtuu yhdisteen määrittäminen tolueeniekvivalenttina, jolloin pitoisuudesta tulee semikvantitatiivinen. Tällöin yhdisteiden tunnistamiseen voi liittyä epävarmuutta, koska tuloksiin voi sisältyä huomattavan suuria pitoisuuksia. Tolueeni eikä muut VOC-yhdisteet reagoi samalla tavalla analyysissä. (Työterveyslaitos a.)

4.2 Ilmasta keräävät menetelmät

Aktiivinen VOC päästömittaus tapahtuu 4-12 litran pumpulla, Tenax TA tai Tenax TA Carbograph 5TD -adsorptioputkella. Analysointi tapahtuu kaasukromatografian avulla hyödyntäen massaselektiivistä ilmaisinta ja termodesorptiota (TD-GC-MS). Tämä mittaus ja

analysointi perustuu standardiin ISO 16000-6. Passiivinen VOC päästömittaus tapahtuu TD-diffuusiokeräin, Tenax TA-adsorbentilla. Analysointi tapahtuu samalla tavalla kuin aktiivisessa menetelmässä, eli kaasukromatografisesti hyödyntäen termodesorptiota ja massaspektrometriaa (TD-GC-MS). Tämä mittaus ja analysointi perustuu standardiin ISO 16000-6 ja ISO 16017-2. (Työterveyslaitos a.)

Aktiivinen formaldehydin ja muiden aldehydien mittaus suoritetaan 60–100 litran näytepumpulla, joka ohjaa näytteen DNPH:lla (2,4-dinitrofenyylihydratsiini) päällystettyyn keräimeen. Analysointi tehdään nestekromatografisesti, hyödyntäen liuotinuuttoa ja diodirividetektoria. Passiivinen mittaus tapahtuu DNPH:lla päällystettyyn suodattimeen, ja analysointi tehdään samalla tavalla kuin aktiivisessa mittauksessa, eli nestekromatografisesti käyttäen liuotinuuttoa ja diodirividetektoria. Mittaus ja analysointi perustuvat standardiin ISO 16000-3. (Työterveyslaitos a.)

Kaasuina esiintyvien PAH-yhdisteiden mittaus suoritetaan 100 litran näytepumpulla, käyttäen XAD-adsorbenttia. Näytteiden analysointi tapahtuu ultraääniavusteisella liuotinuutolla, jota seuraa kaasukromatografia-massaspektrometria. Hiukkasmuodossa esiintyvien PAH-yhdisteiden keräys tehdään vähintään 400 litran näytepumpulla, jossa käytetään teflonsuodatinta. PAH-yhdisteiden mittaus ja analysointi suoritetaan laboratorion omien sisäisten menetelmien mukaisesti. (Työterveyslaitos a.)

Sisustus- ja rakennusmateriaaleista haihtuvia orgaanisia yhdisteitä voidaan mitata eri näytteenottomenetelmillä. Näytteistä analysoidaan yleisesti VOC-yhdisteitä, formaldehydiä, muita aldehydejä ja ammoniakkia, ja käytetyt analysointimenetelmät ovat samanlaisia kuin ilmasta tehtävissä mittauksissa. Jokaisella materiaalipäästöjen analysointimenetelmällä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Bulk-menetelmässä materiaalinäyte jauhetaan, jolloin analysoitava näyte saadaan materiaalin kaikista osista, ei ainoastaan huoneilmaan päin olevasta pinnasta. Tämä voi olla tärkeää esimerkiksi silloin, jos epäillään lattiamateriaalin alapuolelta tulevien päästöjen kulkeutuvan ilmaan muuta reittiä kuin pinnoitteen läpi. Bulk-menetelmän tulokset kertovat materiaalin pitoisuudet, eivätkä ne kuvaa ilmassa olevia pitoisuuksia, joten niitä ei voida suhteuttaa rakennusmateriaalien M1-päästöluokituksen arvoihin tai käyttää terveysvaikutusten arviointiin. Bulk-menetelmän tulokset ovat vain semikvantitatiivisia, ja koska näytteen käsittelyä ei ole vakioitu, eri laboratorioiden tuottamia tuloksia ei voi vertailla keskenään. (Työterveyslaitos a.)

Kammiomenetelmää käytetään uusien ja käyttämättömien rakennusmateriaalien päästöluokitustestauksessa ja kansallista M1-luokitusta voidaan soveltaa myös käytettyjen materiaalien testaamiseen. Kammiomenetelmä perustuu eurooppalaiseen mallihuoneeseen (EN 16516), jossa olosuhteet on määritelty ja vakioitu standardin mukaisesti. Menetelmällä

saatuja tuloksia voidaan käyttää arvioitaessa sisäilman laatuun vaikuttavia päästöjä. Kammiomenetelmä suoritetaan aina laboratorio-olosuhteissa ja näytekappaleen määrä ja koko määräytyvät kammion tilavuuden mukaan. M1-luokituksen raja-arvoja voidaan jossain määrin verrata käytettyjen materiaalien tuloksiin. (Työterveyslaitos a.)

Bulk- eli kokonaisemission mittaus mikrokammiomenetelmällä tehdään ottamalla 10 x 10 cm materiaalipala tai 1–2 ruokalusikallista näytettä. Mittaus ja analysointi perustuvat laboratorion omiin sisäisiin menetelmiin, sillä vakioituja menetelmiä ei ole olemassa. (Työterveyslaitos a.)

4.3 Jatkuvatoiniset mittauslaitteet

Jatkuvatoimisten mittalaitteiden käyttö haihtuvien orgaanisten yhdisteiden mittaamisessa on yleistynyt viime vuosikymmenen aikana sisäilman laadun valvonnassa. Näiden laitteiden luotettavuudesta on kuitenkin vain vähän tutkimustietoa. Jatkuvatoiniset mittalaitteet perustuvat yhdisteiden fotoionisaatioon (PID-mittari), mutta tietoa laitteiden kalibroinnista, valikoivuudesta ja reaktiivisuudesta on saatavilla vain rajoitetusti. Tällä hetkellä ei tiedetä tarkasti, millä laitteilla voidaan mitata mitään yhdisteitä, ja tutkimusten mukaan nykyisillä laitteilla voidaan havaita myös muita kaasuja, kuten hiilidioksidia. Ilmankosteus voi vaikuttaa joidenkin mittarien antureihin. Jatkuvatoinisilla mittalaitteilla voidaan tehdä pitkäaikaisia mittauksia, mikä ei ole mahdollista keräävillä menetelmillä. Niiden avulla voidaan myös havaita hetkellisiä pitoisuusvaihteluita, jolloin tulokset ilmoitetaan haihtuvien orgaanisten yhdisteiden osalta kokonaispitoisuutena. Koska jatkuvatoimiset mittalaitteet keräävät ja raportoivat tietoa eri tavalla kuin keräävät menetelmät, niiden tuloksia ei voi suoraan verrata keskenään. Nykyisellään jatkuvatoimisia mittalaitteita ei voida käyttää yksinomaan sisäilman kemiallisten epäpuhtauksien pitoisuuksien valvontaan, mutta ne antavat suuntaa antavaa tietoa sisäilman pitoisuusmuutoksista. (Työterveyslaitos a.)

Flec (Field and Laboratory Emission Cell) -menetelmä on hyödyllinen, kun halutaan välttää rakenteiden rikkominen. Flec-menetelmällä voidaan seurata päästötasoja pitkällä aikavälillä tai arvioida korjaustoimenpiteiden vaikutusta päästöihin. Mittaolosuhteet ja asetelma poikkeavat eurooppalaisesta mallihuoneesta (EN 16516), joten vertailutulokset saattavat vaihdella, Flec-menetelmän tuloksia ei voida hyödyntää sisäilman pitoisuuksien arvioimiseen. Flec-tulokset tarjoavat suuntaa-antavaa tietoa, mutta niillä ei ole virallisia viitearvoja, joten niitä ei voi verrata M-luokituksen raja-arvoihin. (Työterveyslaitos a.)

Pintaemission mittauksessa FLEC-menetelmällä tutkittava pinta peitetään tiivistettävällä FLEC-laitteistolla, ja laitteeseen syötetään ilmaa esimerkiksi nopeudella 100–300 ml/min. Mittaus ja analysointi perustuvat standardeihin NT build 484 ja ISO 16000-10.

Kammiomenetelmällä tehty pintapäästö mittaus puolestaan toteutetaan käyttämällä suurta ja ehjää materiaalinäytettä, ja mittaus sekä analysointi perustuvat standardeihin ISO 16000-9 ja EN 16516. (Työterveyslaitos a.)

5 Vähentämiskeinot metsäteollisuudessa

5.1 Teknologiset ratkaisut

Adamová T, Hradecký J, Pánek M. (2020) toteavat artikkelissa Volatile Organic Compounds (VOCs) from Wood and Wood-Based Panels: Methods for Evaluation, Potential Health Risks, and Mitigation lämpökäsittelyn vähentävän erityisesti terpeenipäästöjä kuusella ja männyllä. Havupuiden ja poppelin kohdalla lämpökäsittely vähentää heksanaalipäästöjä, mutta lisää furfuraalipäästöjä. Lämpökäsittelyä voidaan kuitenkin käyttää tehokkaana menetelmänä VOC-päästöjen vähentämiseksi ja siten pienentää ihmisille aiheutuvaa terveysriskiä VOC-altistuksen kautta. Puun lämpökäsittely tekee puusta sopivan ja turvallisen materiaalin sisäkäyttöön. (Adamová T, Hradecký J, Pánek M. 2020.)

Pohleven J, Burnard M, Kutnar A. (2019) toteavat tutkimuksessa Volatile Organic Compounds Emitted from Untreated and Thermally Modified Wood, että puun lämpökäsittely parantaa sen ominaisuuksia, kuten mittapysyvyyttä, veden, sään ja rapautumiskestävyyttä, mikä pidentää puun käyttöikä. Lämpökäsittelyssä puun ainesosat hajoavat ja aiheuttavat kemiallisia muutoksia, jotka vaikuttavat puun fysikaalisiin ja biologisiin ominaisuuksiin, mukaan lukien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden VOC-päästöihin. Lämpökäsittelyn jälkeen männystä vapautui vain kuutta eri VOC-yhdistettä alkuperäisten 22 sijaan. Näitä yhdisteitä olivat etikkahappo, furfuraali, 5-metyylifurfuraali, α -pineeni, limoneeni ja heksanaali. (Pohleven J, Burnard M, Kutnar A. 2019.)

Haihtuvat orgaaniset aineet alkavat vapautua puusta jo matalissa lämpötiloissa, ja valtaosa niistä poistuu alle 200 °C. Lämpötilan noustessa yli 200 °C suurin osa haihtuvista aineista on poistunut. Lämpökäsittelyllä voi muuttaa VOC-yhdisteiden määrää ja laatua, vaikuttaen päästöjen tasoon ja koostumukseen. Korkeammat lämpötilat ja pidempi käsittelyaika, erityisesti tyhjiöolosuhteissa, poistavat tehokkaammin haihtuvia terpeenejä, mikä vähentää VOC-päästöjä. Esimerkiksi männyn lämpökäsittely 230 °C 24 tunnin ajan vähensi merkittävästi terpeenien määrää VOC-päästöissä. (Pohleven J et. al 2019.)

Mrouehin (1992) mukaan VOC-päästöjen vähentämiseen voidaan käyttää kolmea erilaista menetelmää. Ensimmäinen menetelmä on korvata tuotteet ja raaka-aineet, jotka sisältävät haihtuvia orgaanisia yhdisteitä. Toinen menetelmä hyödyntää prosessimuutoksia, jotka estävät näiden yhdisteiden haihtumisen. Kolmas vaihtoehto on käyttää kuivauskaasujen puhdistustekniikoita. Koska kaikki prosessit ovat ainutlaatuisia, paras ratkaisu VOC-yhdisteiden hallintaan on arvioida ja ratkaista ongelmat erikseen kussakin prosessissa. (Sabbah 2010.)

Jussila (1995) toteaa, että teollisessa käytössä on lukuisia erilaisia menetelmiä, joilla on totuttu vähentämään VOC-päästöjä. Näitä menetelmiä ovat muun muassa terminen

hapetus, katalyyttinen hapetus, biosuodatus ja biopesuri, erilaiset imeytys ja adsorptiomenetelmät, kondensoituminen sekä kalvoerotusmenetelmä. (Sabbah 2010.)

Jussila (1995) mukaan terminen hapetus on erittäin tehokas menetelmä VOC-päästöjen tuhoamiseen poistokaasuista. Menetelmässä orgaaniset yhdisteet poltetaan korkeissa lämpötiloissa 650-985 °C ja prosessia varten tarvitaan turbulenttia virtausta, jonka oleskeluaika on yleensä 0,3-1,5 sekuntia. Joissakin tapauksissa prosessiin on lisättävä ylimääräistä happea. (Sabbah 2010.)

Jussila (1995) mukaan katalyyttinen hapetus on nopea ja liekitön palamisprosessi, jossa esilämmitetty poistokaasu on kosketuksissa huokoisen katalyyttisesti aktiivisen materiaalin kanssa. Tässä menetelmässä tarvitaan huomattavasti alhaisempi lämpötila 200-500 °C katalyytin ansiosta. Orgaaniset yhdisteet määrittävät menetelmän lämpötilan, ja kaasut hapetuvat hiilidioksidiksi ja vedeksi. (Sabbah 2010.)

Jussila (1995) toteaa, että biologisia kaasujen puhdistusmenetelmiä voidaan käyttää, kun päästöt ovat biohajoavia. Tässä prosessissa mikro-organismit hajottavat haihtuvia orgaanisia epäpuhtauksia sekä joitakin epäorgaanisia epäpuhtauksia. Biosuodatusmenetelmiä käytetään erityisesti suurilla ilmapurkauksilla laimeissa kaasuissa, ja niiden tehokkuus vaihtelee 10–95 % riippuen haihtuvien aineiden tyypistä. Biosuodatuskustannukset ovat alhaisemmat verrattuna hapettamismenetelmiin. Biosuodatuksessa käytetään avointa tai suljettua suodatinvuodetta, prosessi vaatii kaasun esikäsitteilyn, jotta mikro-organismit voivat toimia optimaalisesti. Kaasun tulee olla 98-100 % kosteaa, ja suodatinvuoteen lämpötilan on oltava 14-50 °C. Suuri kaasun virtaus voi lisätä suodattimen tilantarvetta ja kustannuksia merkittävästi. Biopesurit ovat samanlaisia kuin biosuodatus, mutta ne sisältävät vapaata nestefaasia, mikä voi olla hyödyllistä, jos biosuodatus hajotustuotteet vahingoittavat mikro-organismeja. Biopesurit vievät vähemmän tilaa kuin biosuodatus. (Sabbah 2010.)

Karlsson (1990) toteaa, että absorptio on fysikaalinen tai kemiallinen prosessi, jossa atomit, molekyylit tai ionit siirtyvät nesteeseen. Absorptiomenetelmät jaetaan fyysisiin ja kemiallisiin menetelmiin. Fyysinen absorptio voi tapahtua vedessä tai orgaanisessa vaiheessa, kun taas kemiallinen absorptio jaetaan vesiliuokseen ja biopesurissa tapahtuvaan absorptioon. (Sabbah 2010.)

Karlsson (1990) ja Mroueh (1990b) toteavat, että imeytymismenetelmät vaativat hyvin vaakan ympäristön, joten poistokaasut esikäsitellään yleensä ennen imeytysprosessia. Imeytymismenetelmässä orgaanisten yhdisteiden pitoisuus tulisi olla välillä 1–50 g/m³ ja kaasun virtaus vaihtelee tyypillisesti 1 500-170 000 m³/h välillä. Haasteena on, että veden puhdistaminen voi olla hyvin kallista, jos haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuus on liian alhainen, ja prosessi on monimutkainen, koska ongelma siirtyy nesteeseen.

Käyttökustannukset kasvavat, kun puhdistustehokkuus pyritään nostamaan yli 95 %, mikä lisää imeytymisen kustannuksia. (Sabbah 2010.)

Karlsson (1990) ja Mroueh (1990b) kirjoittavat, että adsorptiossa kaasujen molekyylit kiinnittyvät kiinteään materiaalin pinnalle. Tämä prosessi käyttää usein useita adsorptiokammioita, joissa ainakin yksi adsorptiokammio on toiminnassa samalla, kun muut regeneroidaan. Yleisin adsorptiomateriaali on aktiivihiili, joka voi puhdistaa kaasuja yli 95 % tehokkuudella matalissa lämpötiloissa, jopa alle 35 °C. Aktiivihiilen adsorptioon liittyy kuitenkin haasteita, kuten heikko adsorptio tietyille yhdisteille ja tarpeettomien jätevesien syntyminen höyrydesorptiosta. (Sabbah 2010.)

Jussila (1995) toteaa, että kondensoinnissa orgaaniset yhdisteet palautetaan nesteeksi sen jälkeen, kun pakokaasut on tiivistetty. Kondensointi vaatii joko matalampaa lämpötilaa tai korkeampaa höyrynpaineita, kunnes yhdisteiden kyllästymispiste on saavutettu. Kondensointi voidaan suorittaa suoran tai epäsuoran lämmönvaihdon avulla. Suorassa lämmönvaihdossa jäähdytysliuos sekoitetaan pakokaasuihin, kun taas epäsuorassa lämmönvaihdossa jäähdytys tapahtuu kaasulämmönvaihtimessa. (Sabbah 2010.)

Emission factor (1997) toteaa että Ionisoiva märkäpuhdistin (IWS = Ionizing Wet Scrubber) yhdistää sähköstaattiset voimat ja pakopuhdistustekniikat päästöjen vähentämiseksi. Elektrifioitu suodatinvuode (EFB = An Electrified Filter Bed) käyttää sähköstaattisia voimia saastuttajien houkuttelemiseksi sähköisesti varattuun hiekka-alustaan. (Sabbah 2010.)

Baldwin (1995) kirjoittaa, että märkä sähköstaattinen suodatin (WESP=Wet Electrostatic Precipitator) toimii siten, että kaasut puhalletaan laatikkoon tuulettimen avulla. Ilmavirta ohjataan keräyslevyjen tai putkien muodostamiin väyliin, ja purkauselektrodit antavat negatiivisen varauksen pölyhiukkasille. Positiivisesti varautuneet keräyslevyt tai -putket vetävät puoleensa negatiivisesti varautuneita hiukkasia, jotka kerätään ja kuljetetaan alaspäin vettä valuvan kalvon avulla. (Sabbah 2010.)

Baldwin (1995) toteaa, että märkäpesureista on tullut eniten käytetty tapa vähentää VOC-päästöjä viilunkuivaimissa. Suomessa nämä märkäpesurit asennetaan ensisijaisesti lämmönvaihtoa varten. Lämmitetty vesi ohjataan yleensä liotusaltaaseen. (Sabbah 2010.)

Banerjee S., Connors T. (2007) toteavat raportissa "Implementing Strategies for Drying and Pressing Wood Without Emissions Controls" että on olemassa kaksi lähestymistapaa VOC-päästöjen hallintaan: tuoreen puun lämmitys tai säteilytys mikroaaltoenergialla matalassa paineessa, jossa haihtuminen on minimoitu. OSB-tuotannossa tuoreiden lastujen lämmittäminen matalassa lämpötilassa vapauttaa VOC-yhdisteitä, mutta se myös vapauttaa suhteessa vähemmän vettä. Tämä menetelmä mahdollistaa VOC-yhdisteiden erottamisen ja

keräämisen tuoreesta puusta ennen varsinaista kuivausta, mikä vähentää päästöjä kuivausprosessin aikana.

Lastujen mikroaaltosäteilytys johtaa päinvastaiseen ilmiöön. Mikroaaltosäteily matalassa lämpötilassa poistaa VOC-yhdisteitä puusta, mutta säilyttää veden. Jäljelle jäänyt vesi siirtää VOC-yhdisteet vettähykivistä alueista, kuten hartsikanavista, joissa ne normaalisti sijaitsevat, vesipitoisiin alueisiin. Mikroaaltotehostettua prosessia voidaan säätää joko VOC-yhdisteiden tai veden poistamiseksi muuttamalla mikroaaltosäteilyn voimakkuutta. Suurin osa kuivausprosessissa haihtuneista VOC-yhdisteistä tulee puun pinnalta. Mikroaaltosäteilytys parantaa veden tunkeutumista puun rakenteeseen ja auttaa poistamaan terpeenejä pienellä höyrymäärällä. Vastaavia tuloksia saadaan myös matalan lämpötilan radiotaajuussäteilytyksellä (RF), joka ei merkittävästi heikennä puun lujuutta. (Banerjee S., Connors T. 2007.)

Tulokset osoittavat, että korkeassa lämpötilassa tapahtuva höyrytys poistaa tehokkaasti VOC-yhdisteitä. Mikroaalto- ja RF-menetelmät ovat kuitenkin lupaavampia, koska ne minimoivat veden haihtumisen samalla, kun ne poistavat VOC-yhdisteitä. (Banerjee S., Connors T. 2007). Alla taulukko 1 höyrytyksen tulokset.

VOC-päästöt höyrytetyistä hiukkasista kuivattaessa ¹				
Korkea lämpötilan höyrytys				
Höyrytysaika (min)	Höyrytyslämpötila (°C)	VOC (µg/g, kuivan perusteella) ²	Näytteiden määrä	Mitatut VOC-yhdisteet (%) ³
0 (Ohjaus)		1300 ± 200	8	Ei selvitetty
15	174	580 ± 30	4	81
30	179	490 ± 10	4	112
30	174	510 ± 40	4	89
30	178	690 ± 30	4	32
30	152	720 ± 80	3	Ei selvitetty
60	172	490 ± 80	4	76
60	178	510 ± 40	4	Ei selvitetty
Matalalämpötilan höyrytys				
30	119	830 ± 10	4	18
30	122	810 ± 50	4	12
130°C 30 minuutin ajan ² epävarmuus keskihajonta ³ n=1 mitattu kaasukromatografialla				

Taulukko 1. Höyrytyksellä tehdyt tulokset (Banerjee S., Connors T. 2007, 17)

Tulosten mukaan yli 45 % VOC-yhdisteistä poistui, kun puukappaleita höyrytettiin korkeassa lämpötilassa, yli 150 °C asteessa. Höyrytysajan pidentäminen 30 minuutista 60 minuuttiin ei merkittävästi lisännyt poistettujen VOC-yhdisteiden määrää, mutta vaikutti kappaleen värin tummumiseen. Matalalämpötilan höyrytys poisti vain pieniä määriä VOC-yhdisteitä. (Banerjee S., Connors T. 2007.)

Aiemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että esimerkiksi eukalyptuksen esihöyrytys siirtää sydänpuun uutteita, mikä viittaa siihen, että vesi pääsee paremmin soluseiniin. Vesi imee mikroaaltosäteilyä helpommin kuin puu, mikä aiheuttaa puun lämpenemisen ensisijaisesti veden kautta. Tästä syystä mikroaalto- ja radioaaltokäsittelyt ovat tehokkaampia kuin höyrytys. Käytännössä lyhyt mikroaalto- tai radiotaajuuskäsittely poistaa tehokkaasti VOC-yhdisteitä puusta, ja vapautunut höyry voidaan tiivistää VOC-yhdisteiden keräämiseksi. Alla on taulukko 2, joka esittelee mikroaaltokäsittelyn testitulokset. (Banerjee S., Connors T. 2007.)

VOC-päästöt mikroaaltouunissa käsitellystä puusta ¹	
Mikroaaltokäsittelyolosuhteet	VOC (µg/g, kuivan perusteella)
Ohjaus	536
600 W, 3 min.	329
Ohjaus	857
1200 W, 1 min.	145
Ohjaus	767
1200 W, 1 min.	266
¹ 130 °C yli 60 minuutin ajan	

Taulukko 2. VOC-päästöt mikroaaltotestauksen tuloksista (Banerjee S., Connors T. 2007, 18)

Tulokset osoittavat, että mikroaaltokäsitellyn puun VOC-päästöt ovat merkittävästi vähentyneet, mikä viittaa siihen, että suurin osa VOC-yhdisteistä on poistunut mikroaaltokäsittelyn aikana. Lyhytkestoinen mikroaaltokäsittely matalassa lämpötilassa poistaa tehokkaasti suurimman osan VOC-yhdisteistä säilyttäen samalla veden puussa. (Banerjee S., Connors T. 2007.)

Mikroaalto- ja radiotaajuuskäsittelyt vapauttavat tehokkaasti VOC-päästöjä puusta, jolloin vesi säilyy puussa ja kuljettaa VOC-yhdisteet ulos. Menetelmä on huomattavasti

nopeampi kuin perinteinen höyrytys eikä heikennä merkittävästi puun lujuutta. Alla on vielä RF-käsittelyn tulokset taulukossa 3. (Banerjee S., Connors T. 2007.)

VOC-päästöt RF-käsittelystä puusta ¹				
Tunnistus	RF aika/kokonaisaika (min)	RF-ampeerit	Painon häviö (%)	VOC (µg/g)
	0			1,680
C	30/30	0.8	2.8	760
F	12/30	1.1	4.0	350
H	12/15	1.1	3.8	820
A	9/9	1.1	2.2	1,000
¹ Vihreä paino				

Taulukko 3. RF-tekniikalla tehty testin tulokset (Banerjee S., Connors T. 2007, 18)

RF-aika viittaa varsinaiseen säteilytysaikaan, kun taas kokonaisaika sisältää lisääjän, jolloin puu pidettiin sylinterissä riippumatta siitä, oliko RF-yksikkö toiminnassa vai ei. RF-esikäsittelyllä voidaan vähentää VOC-päästöjä. Kuten taulukosta ilmenee, parhaimmillaan (F) saavutettiin 79 % VOC-päästöjen vähennys. Tämä saavutettiin samalla, kun veden häviö oli minimaalinen, mikä osoittaa RF-käsittelyn potentiaalisen VOC-yhdisteiden poistamisessa. (Banerjee S., Connors T. 2007.)

5.2 Operatiiviset ratkaisut

(Ohlmeyer, M., Rohumaa, A., Antikainen, T. & Hughes, M. (2009) tutkimuksen Evaluation of Parameters Influencing the VOC Emissions from Plywood tavoitteena oli määrittää valittujen prosessiparametrien vaikutus vanerin formaldehydi- ja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöihin. Testin valmistuksessa käytettiin 10 eri puuta, jotka olivat 30-40 cm paksumia tukkeja. Puulajit, joita tutkimuksessa käytettiin, olivat rauduskoivu (*Betula pendula*), metsäkuusi (*Picea abies*) ja Mänty (*Pinus sylvestris*). Tukit leikattiin 1,2 m pituuteen ja niitä liotettiin joko 20°C tai 70°C vedessä 48 tunnin ajan. Sorvaus suoritettiin Raute Oy sorvilla. Viilun paksuus saatiin 1,5 mm ja leveys 900 mm. Sorvauksen jälkeen viilut leikattiin 450 mm pituisiksi.

Viilut kuivattiin 30 °C, 140 °C ja 180 °C lämpötiloissa. Viilun kuivaus 30 °C tapahtui ilmastoidussa kammiossa, jossa suhteellinen ilmankosteus oli 25 %. 140°C ja 180°C kuivaus tapahtui laboratoriomittakaavan viilunkuivaimessa. Viilujen tavoite kosteus oli 3-5 %. Liimausta ennen viilut käsiteltiin 72 tuntia 20 °C ja 30 % suhteellisessa kosteudessa. Liiman levitys tehtiin telalevittimellä, ja liimaseos koostui fenoliformaldehydihartsista, kovetteesta

ja vedestä suhteessa 100: 20: 26. Liima levitettiin joka toisen viulun pinnalle. Viiluarkkeja oli 11 kpl ja levyn nimellispaksuus oli 16,5 mm. Levyt esipuristettiin 0,9 MPa paineella 10 minuutin ajan. Kuumapuristus suoritettiin 1,8MPa paineella niin, että 1 minuutti per viulun paksuuden millimetri lämpötiloissa joko 135 °C tai 180 °C. Tutkimuksessa käytettiin kaikissa testeissä samoja parametrejä, vaikka ne eivät olleet tietyn puulajin kohdalla täydellisiä. Näin saatiin yhdenvertainen kuva vertailusta puulajien välillä. Alla taulukko 4. puulajien haudutus, kuivaus ja puristus lämpötiloista. (Ohlmeyer, M., Rohumaa, A., Antikainen, T. & Hughes, M. 2009.)

Näyte nro	Puulaji	Haudonta Lämpötila (°C)	Kuivaus Lämpötila (°C)	Puristus Lämpötila (°C)
1	Mänty, Pintapuu	20	30	135
2	Mänty, Pintapuu	70	30	135
3	Mänty, Sydänpuu	20	30	135
4	Mänty, Sydänpuu	70	30	135
5	Mänty, Sydänpuu	20	140	135
6	Mänty, Sydänpuu	20	180	135
7	Mänty, Sydänpuu	20	140	180
8	Kuusi	20	30	135
9	Kuusi	70	30	135
10	Koivu	20	30	135
11	Koivu	70	30	135
12	Koivu	20	140	135
13	Koivu	20	180	135
14	Koivu	20	140	180

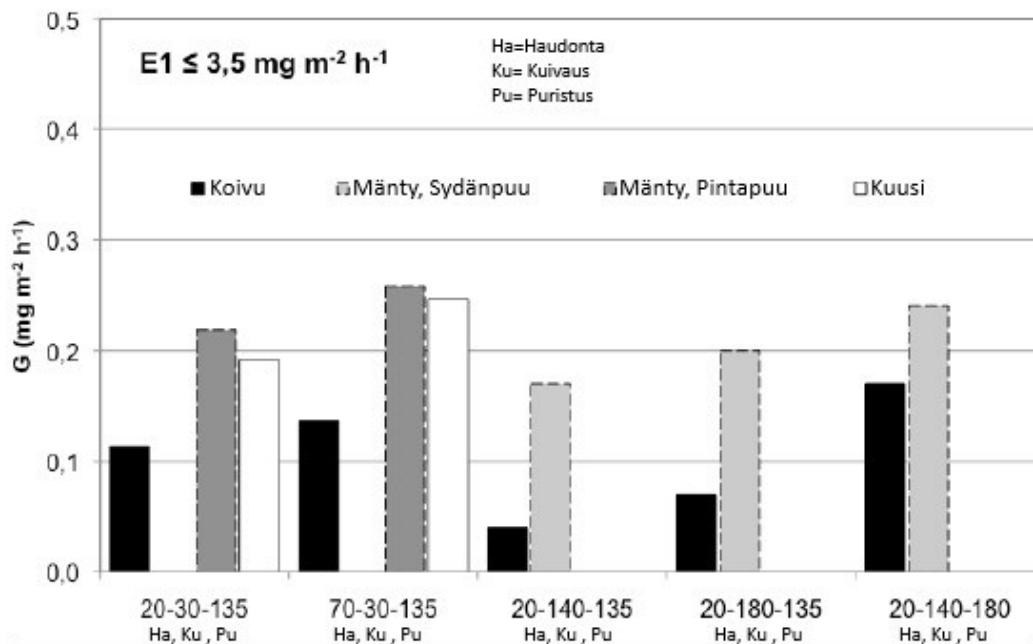
Taulukko 4. Puulajien haudonta, kuivaus ja puristuslämpötilat (Ohlmeyer, M., Rohumaa, A., Antikainen, T. & Hughes, M. 2009, 3)

Vanerinäytteistä testattiin formaldehydipäästöt standardin EN 717-2:1995 mukaisesti. Tutkimuksessa käytettiin kaasuanalysaattoria formaldehydin mittaamiseksi. Standardin mukaisesti ilmavirtaus johdettiin neljän kahden impingerin (laite, joka kerää hiukkasia ja kemiallisia yhdisteitä ilmasta) läpi yhden tunnin ajan. Jokaisessa testissä kerättiin neljä ilmatiivisti suljettua näytettä. Standardin vaatimusten mukaan näytteen pinta-ala oli 400 cm² ja lämpötila 60 °C. Vanerilevyt leikattiin 21 x 21 cm² kokoisiksi näytelevyiksi. Näytelevyjen reunat liimattiin vähäpäästöisellä alumiiniteipillä. (Ohlmeyer, M. et al 2009.)

Näytelevyt asetettiin ympäristötetauskammioon vuorokauden jälkeen valmistuksesta. Testausta suoritettiin 28 päivän ajan. Testaus, näytteenotto ja analyysimenetelmät sekä laitteisto olivat ISO 16000-9:2008 ja ISO 16000-6:2004 standardien mukaisia. Ilmanäytteet

kerättiin Tenax TA 200 mg ilmamittapumpulla, jossa oli elektroninen virtauksen säädin. Näytteenottovirtaus oli 100 ± 1 ml min ajanjaksolla 5-40 minuuttia, mikä vastasi kokonaistilavuuksia 0,5-4 litraa.

Prosessiolosuhteiden havaittiin kuitenkin vaikuttavan formaldehydipäästötasoon. Liotuksen tai haudontalämpötilan nostaminen $20\text{ °C} - 70\text{ °C}$ lisäsi formaldehydin vapautumista koivusta, männyn pintapuusta ja kuusesta valmistetuista levyistä. Korkeampi kuivauslämpötila $140\text{ °C} - 180\text{ °C}$ sekä puristuslämpötila $135\text{ °C} - 180\text{ °C}$ lisäsivät myös koivusta ja männyn sydänpuusta valmistettujen näytteiden formaldehydipäästöjä. Kaikki testatut näytteet vapauttivat formaldehydiä alle $0,3\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$. Näin ollen näytteet päästävät vain kymmenesosan E1-raja-arvosta, joka on $3,5\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ EN 636:2003-standardin mukaan. (Ohlmeyer, M. et. al 2009.) Alla esitetty taulukossa 5 formaldehydipäästöt testaus EN 717-2 mukaisesti.



Taulukko 5. Eri parametreillä valmistettujen levyjen formaldehydipäästöt (Ohlmeyer, M., Rohumaa, A., Antikainen, T. & Hughes, M. 2009, 5)

Testissä seurattiin männyn sydänpuusta valmistetun vanerin päästöjä 35 päivän ajan. Terpeenien päästöt vähenivät ajan myötä, mikä on tyypillistä männyn pihkan haihtuville yhdisteille. Kyllästyneiden aldehydien päästöt kasvoivat aluksi ja saavuttivat huippunsa noin 14 päivän kohdalla, jonka jälkeen ne alkoivat laskea. Testissä todetaan vanereiden TVOC-päästöjen osalta koivuvanerissa mittauksen alhaisimmat pitoisuudet $99\text{ }\mu\text{g/m}^3$ 28 päivän

jälkeen, seuraavaksi alhaisimmat pitoisuudet todettiin kuudessa 113 µg/m³ 28 päivän jälkeen ja mäntyvanerin (pintapuu) 489 µg/m³ 28 päivän jälkeen. Korkeimmat päästöt havaittiin mäntyvanerissa (sydänpuu) 742 µg/m³ 28 päivän jälkeen. Tulokset ovat vertailukelpoisia, koska levyt valmistettiin samoilla parametreilla. (Ohlmeyer, M. et al 2009.)

Haudontalämpötilan nostaminen 20 °C - 70 °C vähensi TVOC-pitoisuutta kuusesta ja männystä valmistetuissa vanereissa. Kuusivanerissa terpeenien ja kyllästettyjen aldehydien päästöt vähenivät merkittävästi korkeammalla haudontalämpötilalla, kun taas mäntypuuvanerin päästöt olivat alhaisempia, mutta eivät muuttuneet yhtä paljon haudontalämpötilan noustessa. Muut aineet, kuten orgaaniset hapot, vaikuttivat vain vähän. (Ohlmeyer, M. et al 2009.)

Tutkimuksen yhteenvedona männynsydänpuu aiheutti eniten TVOC-päästöjä. Merkittävimmät VOC-päästöaineet olivat terpeenit, aldehydit ja orgaaniset hapot. Korkeampi haudutuslämpötila vaikutti kuusen ja männyn VOC-päästöjen vähentymiseen, mutta koivun kohdalla päästöt nousivat. Korkeampi kuivaus ja puristuslämpötila vähensi VOC-päästöjä kaikista puulajeista 28 päivän testauksen jälkeen. (Ohlmeyer, M. et al 2009.)

Józwiak, M. Czajka M. (2013) tutkivat tutkimuksessa Investigation of VOC emissions from pine plywood mäntyvanerin VOC-päästöjä. Tutkimuksessa käytettiin männyn viilua, joka oli varastoitu kahdelle eri ajalle: 4 päivää ja 180 päivää. Viilut valmistettiin hauduttamalla tukki ja sorvaamalla tukista viilua kokoon 300 x 300 x 1,8 ± 0,1 mm. Viilut kuivattiin kosteusprosenttiin 6 ± 1 %. Vaneri valmistettiin viiluista käyttämällä (MUF= melamiiniureaformaldehydi)-hartsista liimaa, jossa kovetin aineena oli 3,2 % ammoniumnitraattia (NH₄NO₃). Liimaa levitettiin viilulle 180 g/m². Kolmikerroksiset kappaleet puristettiin 125 °C asteessa 5 minuutin ajan 1,2 MPa paineessa. VOC-päästöjen määrittäminen suoritettiin TD-GC/MS-menetelmällä. (Józwiak, M. Czajka, M. 2013.)

Viilujen ja vanerin päästöissä havaittiin, että 4 päivän varastoinnin jälkeen VOC-päästöt olivat korkeat. Pääasiassa monoterpeenit muodostivat 99,9 % viilujen päästöistä ja 91,7 % vanerin päästöistä. Pääasiassa tunnistettuja terpeenejä olivat α-pineenia ja 3-careenia. Varastoinnin aikana monoterpeenien pitoisuus laski jyrkästi ja niiden tilalle muodostui karbonyyliyhdisteitä, kuten heksanaalia. 180 päivän varastoinnin jälkeen viiluissa ja vanerissa havaittiin vain pieniä määriä α-pineenia, 3-careenia ja β-mykeenaa. Karbonyyliyhdisteistä heksanaalia esiintyi eniten. Karbonyyliyhdisteiden päästöjen määrä korreloi varastointiajan kanssa ja lisääntyi ajan myötä. Varastointiajan pidentyessä VOC-päästöjen koostumus muuttui, mikä korostaa varastoinnin ja prosessointiparametrien vaikutusta päästöihin. (Józwiak, M. et al 2013.)

Ramos-Maldonado M, Aguilera-Carrasco C. (2021) toteavat katsauksessaan Trends and Opportunities of Industry 4.0 in Wood Manufacturing Processes, että teollisuus 4.0 hyödyntää digitaalisia teknologioita, kuten tekoälyä, koneoppimista ja esineiden internetiä (IoT), jotka voivat parantaa päätöksentekoa ja prosessinhallintaa. Tämä on erityisen tärkeää puunjalostuksessa, sillä puu on luonnonmateriaali, jonka ominaisuudet vaihtelevat merkittävästi. (Ramos-Maldonado M, Aguilera-Carrasco C. 2021.)

Puunjalostusprosessit ovat monimutkaisia, ja niitä voidaan optimoida reaaliaikaisilla sensoreilla, jotka mittaavat esimerkiksi lämpötilaa, kosteutta, kulutusta ja värinää. Näitä dataja voidaan analysoida koneoppimismalleilla, jotka ennustavat ja optimoivat prosesseja, vähentäen virheitä ja parantaen laatua. Esimerkiksi anturit voivat havaita kulutusjälkiä leikkutyökaluissa ja säätää toimintoja vastaavasti, mikä vähentää hukkaa ja päästöjä. (Ramos-Maldonado M, Aguilera-Carrasco C. 2021.)

Teollisuus 4.0 keskeisiä komponentteja ovat teollinen internet, pilvipalvelut, virtuaalitehdas (digitaalinen kaksonen) ja kyberfyysiset järjestelmät. Näiden avulla voidaan rakentaa älykkäitä ja autonomisia tuotantjärjestelmiä, jotka mukautuvat nopeasti muuttuviin olosuhteisiin. Puunjalostusteollisuudessa sensoriteknologian kehitys ja tekoälyn hyödyntäminen tarjoavat uusia mahdollisuuksia parantaa tuottavuutta ja kestävyttä. Tutkimuksen ja teollisuuden yhteistyö on ratkaisevaa datan hyödyntämisessä ja älykkäiden järjestelmien kehittämisessä. (Ramos-Maldonado M. et. al. 2021.)

5.3 Innovatiiviset ratkaisut

Ligniini-pohjaista hiukkaspinnoitetta käsittelevässä tutkimuksessa esiteltiin uusi, biopohjainen, kestävä ja moniresistentti nanorakenteinen pinnoite, joka koostui kolloidisista ligniinipartikkeleista ja epoksista. Tutkimus toteutettiin tukemaan maailmanlaajuisia kestävä kehityksen ponnisteluja, sillä monet maat ovat siirtymässä betonista puun käyttöön rakennusmateriaalina. (Henn K, Forsman N, Zou T, Österberg M. 2021.)

Nykyiset suojapinnoitteet materiaaleille, kuten puulle, betonille, metallille ja komposiiteille ovat öljypohjaisia, mukaan lukien esimerkiksi polyuretaanit, epoksit, polyfenolit, akryylihartsit ja polyamidit. Lainsäädäntötoimet ajavat pinnoiteteollisuuden etsimään turvallisempaa ja kestävämpää vaihtoehtoa nykyisten pinnoitteiden tilalle. VOC-päästöjen määrää on säädelty niiden haitallisuuden vuoksi. EU on kieltänyt joitain pinnoiteteollisuudessa käytettäviä kemikaaleja; tämän takia biopohjaisten pinnoitteiden alhaisten kustannusten, turvallisuuden ja korkean suorituskyvyn saavuttaminen on ratkaisevan tärkeää. (Henn K et al. 2021.)

Tutkimuksessa käytetty ligniini oli Biopiva 100 -kraft-ligniiniä. Pinnoitteen tarkoituksena oli luoda vesipohjainen, liuotteeton ja moniresistentti pinnoite, joka kestää erilaisia

ympäristöolosuhteita ja kulutusta. Ligniini-partikkelit valmistettiin sekoittamalla etanolia, tetrahydrofuraania, deionisoitua vettä ja kraft-ligniiniä suljetussa astiassa kolmen tunnin ajan. Pinnoitteen valmistuksessa käytettiin glyserolidiglycidyyli eetteriä epoksiyhdisteenä. Pinnoitteet levitettiin puu- ja metallialustoille, ja niiden kuivumista seurattiin Fourier-muunnos-infrapunaspektroskopian avulla. (Henn K et al. 2021.)

Tutkimuksen tulokset osoittivat, että ligniinipohjaiset nanopartikkelipinnoitteet kestivät hyvin liuottimia, tahroja, kulutusta, lämpöä ja valoa. Käytetyt nanopartikkelit paransivat pinnoitteen vedenhylkivyyttä ja hengittävyttä, minkä lisäksi ne säilyttivät puualustan luonnollisen kosteudensietokyvyn paremmin kuin kaupalliset pinnoitteet Tikkurila KIVA 70 -puulakka, Teknos Woodex -puuöljy ja Solmaster EP10 -epoksi. Ligniini-pohjaisten nanopartikkelien vettä hylkivät ominaisuudet mahdollistivat näiden vesipohjaisten ja liuotteettomien pinnoitteiden valmistuksen. Optimaaliseksi GDE (glyserolidiglycidyyli eetteri) / CLP (Kolloidiset ligniinipartikkelit) -massasuhteeksi osoittautui 0,52-0,65 g/g, mikä tuotti parhaan tasapainon kestävyden ja suorituskyvyn välillä. Tulokset osoittavat, että tällainen pinnoite voi olla kestävä, skaalautuva ja ympäristöystävällinen vaihtoehto perinteisille pinnoitteille. Tämä avaa uusia mahdollisuuksia ligniinipartikkelien käyttöön pintakäsittelyissä ja laajentaa partikkelipinnoitteiden käyttömahdollisuuksia. (Henn K et al. 2021.)

6 Kansalliset säädökset

6.1 Ohjeistukset ja suositukset

Terveyden ja hyvinvoinninlaitoksen (THL) johtama kansallinen sisäilma ja terveysohjelma on vuonna 2022 tuottanut uutta tietoa ja ohjeita sisäilmaan liittyvien ongelmien ratkaisuun. Ohjeet on tarkoitettu ensisijaisesti sisäilman ja rakennusterveystarkastajille ja työterveyslääkäreille. Ohjeista hyötyvät myös työnantajat, kiinteistöjen omistajat, viranomaiset, työsuojelun ja terveydenhuollon ammattilaiset. (Työterveyslaitos b.)

Terveyteen vaikuttaa monet tekijät. Esimerkkinä terveyteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa käytetyt materiaalit ja niistä haihtuvat orgaaniset yhdisteet, tilan käyttäjät ja heidän toimintansa sekä käyttäjien määrä. Lisäksi tärkeitä ovat ympäristötekijät, kuten ilmasto, liikenne, maaperä, työn laatu, tiloissa käytetyt laitteet, rakennuksen materiaalit ja rakenteet, ilmanvaihto, lämpöolosuhteet sekä tilojen puhtaus. (Työterveyslaitos b.)

Sisäilmaselvityksissä käytetään monia erilaisia ohjeita ja säädöksiä mittaustulosten arvioimiseen, kuten esimerkiksi asumisterveysasetuksen (545/2015) toimenpiderajoja ja työterveyslaitoksen viitearvoja ja terveysperusteisia EU-LCI-ohjearvoja (LCI = Lowest Concentration of Interest) käytetään arvioimaan sisäilman laatua. (Työterveyslaitos b.)

EU-LCI-arvot ovat terveyteen perustuvia viitepitoisuuksia, joilla käytetään arvioidaan kemiallisten aineiden päästöjä yhden rakennustuotteen 28 päivän altistuksen jälkeen laboratorioskammiossa EN 16516 -standardin mukaisesti. Näitä arvoja käytetään tuoteturvallisuuden arvioinnissa, ja niiden tavoitteena on välttää terveysriskit, jotka voivat johtua väestön pitkäaikaisesta altistumisesta. EU-LCI-arvot ilmaistaan yksikköinä $\mu\text{g}/\text{m}^3$. EU-LCI-arvot on kehitetty yksittäisten rakennustuotteiden päästöjen arviointiin, eivätkä ne ole ohjearvoja sisäilman laadulle. EU-LCI-arvot perustuvat epidemiologisten ja toksikologisten tietojen kokoelmaan, joka on kerätty kansainvälisten ja kansallisten komiteoiden riskinarviointien ja muiden merkityksellisten tutkimusten pohjalta. Näin ollen EU-LCI-arvot edustavat pitoisuustasoja, joiden ei arvioida aiheuttavan haitallisia vaikutuksia pitkäaikaisen altistuksen aikana. (EU Commission.)

Rakennusmateriaalien M1-päästöluokitus on auttanut parantamaan suomalaista sisäilmaa vuodesta 1996. M1-luokitustunnus tuotteessa takaa, että tuote on vähäpäästöinen ja sen käyttö tukee hyvää sisäilmaa. M1-luokitus on vapaaehtoinen päästöluokitus, jota maahantuojat tai valmistajat voi hakea tuotteelleen. (Rakennustieto 2024.)

6.2 EU:n direktiivit ja määräykset

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivillä 2004/42/EY pyritään vähentämään haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) päästöjä maaleista, lakoista ja ajoneuvojen korjausmaalaustuotteista, koska ne myötävaikuttavat ilman pilaantumiseen ja alailmakehän otsonin muodostumiseen. Yhtenäisten säädösten puuttuessa jäsenvaltioiden lainsäädäntö voi vaihdella, mikä voi aiheuttaa kaupan esteitä ja kilpailun vääristymistä. Direktiivillä pyritään yhdenmukaistamaan nämä säädökset EU-tasolla. Direktiivi koskee tiettyjä maaleja, lakkoja ja ajoneuvojen korjausmaalaustuotteita. Direktiivi ei rajoita muita kansallisia tai EU-tason kuluttaja- ja työntekijäsuojelutoimenpiteitä. VOC-yhdisteeksi määritellään orgaaninen yhdiste, jonka alkukiehumispiste on enintään 250 °C. (Direktiivi 2004/42/EY.)

Jäsenvaltioiden tulee varmistaa, että direktiivin piiriin kuuluvia tuotteita saa myydä vain, jos ne täyttävät direktiivin liitteessä II määritellyt VOC-pitoisuuden raja-arvot. VOC-pitoisuuden mittaamiseen käytetään direktiivin liitteessä III määriteltyjä analyysimenetelmiä. Tuotteet, joihin lisätään liuottimia, on arvioitava käyttövalmiina tuotteina. Jäsenvaltiot voivat myöntää poikkeuksia erityisiin tarkoituksiin, kuten historiallisten rakennusten ja ajoneuvojen entisöimiseen, mikäli näitä ei voida toteuttaa rajoja täyttävillä tuotteilla. Tavoitteena on siis varmistaa ympäristön suojeleu vähentämällä VOC-yhdisteiden päästöjä, samalla säilyttäen sisämarkkinoiden toimivuus ja edistäen yhteisiä teknisiä vaatimuksia jäsenvaltioissa. (Direktiivi 2004/42/EY.)

7 M1-luokitus

7.1 M1-tuotteen vaatimukset

Rakennusmateriaalien päästöluokituksen tarkoituksena on arvioida asuin- ja työtiloissa käytettävien materiaalien ja kalusteiden päästöjä. Luokitus perustuu Sisäilmastoluokitus 2018 -dokumenttiin sekä luokituspäätöksen tekohetkellä voimassa oleviin periaatteisiin ja kriteereihin. Rakennustietosäätiö RTS sr omistaa päästöluokituksen, ja luokitustoimintaa operoi Rakennustieto Oy, joka myöntää luokitustodistukset. (Rakennustieto.)

M1-luokitukseen voidaan myös liittää vapaaehtoinen tarkastelu rakennusmateriaalin päästöarvoista, esimerkiksi EU-taksonomian tai SINTEF- tutkimuslaitoksen (norjalainen tutkimuslaitos) sisäilmaa koskevien päästökriteerien todentamiseksi. Käyttökohteen perusteella voidaan valita kaksi eri laajuutta raja-arvotarkasteluun (Rakennustieto):

1. formaldehydimissio $< 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja karsinogeenisten yhdisteiden emissio $< 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (taksonomiaraportointia varten)
2. formaldehydimissio $< 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja karsinogeenisten yhdisteiden emissio $< 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaisemissio (TVOC) $< 300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (kattaa sekä taksonomia- että SINTEF-raportin vaatimukset).

Sisäilmaluokitus on kolmitasoinen: S1-, S2- ja S3-laatuluokat. Sisäilmastoluokitus S1 tarkoittaa, että tilan sisäilma on käyttäjäkokemukseltaan korkeampi, kuin muissa laatuluokissa. Tavoitteen määrittäminen sisäilmalle edistää monitoimijayhteistyötä ja vähentää terveyteen ja viihtyvyyteen liittyvien ongelmien riskiä. (Sisäilmaluokitus 2018, 5.)

S1: Yksilöllinen sisäilmasto

Tilassa ei havaita hajuja, joten sisäilman laatu on erittäin hyvä. Tilaan liittyvät muut tilat ja rakenteet eivät aiheuta sisäilman laadun heikkenemistä tai epäpuhtauksia. Tilan lämpötilaolosuhteet ovat viihtyisät, eikä tila aiheuta vetoa tai yllämpenemistä. Tilankäyttäjä voi itse säätää ja hallita tilan lämpötilaa. Tiloissa ovat hyvät ääniolosuhteet käyttötarkoitukseen nähden sekä valaistus, jota voidaan säätää yksilöllisesti ja joka tukee tilan käyttöä. (Sisäilmaluokitus 2018, 5.)

S2: Hyvä sisäilmasto

Tilassa ei ole häiritseviä hajuja ja sisäilman laatu on hyvä. Tilaan liittyvät muut tilat ja rakenteet eivät aiheuta sisäilman laadun heikkenemistä tai epäpuhtauksia. Tilan lämpötilaolosuhteet ovat hyvät vetoa ei yleensä esiinny, mutta kesällä voi esiintyä yllämpenemistä. Tiloissa

ovat hyvät ääni- ja valaistusolosuhteet niiden käyttötarkoitukseen nähden. (Sisäilmaluokitus 2018, 5.)

S3: Tyydyttävä sisäilmasto

Paikan sisäilman laatu, lämpöolosuhteet sekä valaistus- ja ääniolosuhteet täyttävät maan- käyttö- ja rakennuslain sekä terveydensuojelulain asetetut vähimmäisvaatimukset. Näiden asetusten täyttäminen ei aina vaadi S3-luokan tavoitearvojen käyttöä, mutta S3-luokan arvot on esitetty vertailun helpottamiseksi. Eri tavoite- ja suunnitteluarvot voidaan valita eri laatuluokista, ja halutessa arvot pystytään määrittämään yksilöllisesti. (Sisäilmaluokitus 2018, 5.) Alla olevassa taulukossa 6 esitetään sisäilmaston arvot.

Ominaisuus	S1	S2	S3
Hiilidioksidipitoisuuslisä <i>ppm</i> *	< 350	< 550	< 800
Radonpitoisuus <i>Bq/m³</i>	< 100	< 100	< 200
PM _{2.5} <i>µg/m³</i>	< 10	< 10	< 25
PM _{2.5} , sisällä/ulkona	< 0,5	< 0,7	–
Ilman suhteellinen kosteus	–	–	–
Olosuhteiden pysyvyys			
Toimi- ja opetustilat	90 %	90 %	–
Asunnot	90 %	80 %	–

* suurempi kuin ulkoilman hiilidioksidipitoisuus.

Taulukko 6. Sisäympäristön laadun tavoitearvot (Muokattu Sisäilmaluokitus 2018)

Rakennus- ja sisustustarvikkeista haihtuu sisäilmaan erilaisia yhdisteitä, jotka voivat olla peräisin valmistusprosessin virheistä, materiaalien vanhenemisesta tai käytetyistä materiaaleista sekä niiden väärästä käytöstä. Sisäilman epäpuhtauspitoisuudet riippuvat materiaalien kokonaispäästöistä ja ilmanvaihdosta. Sisäilman epäpuhtauksia pystytään vähentää vähentämällä yhteispäästöjä, parantamalla ilmanvaihtoa ja lisäämällä järjestelmän toimivuutta. Pyrkinessä mataliin saastepitoisuuksiin on ensisijaisesti tärkeää vähentää yhteispäästöjä valitsemalla matalapäästöisiä materiaaleja. Ilmanvaihdon lisääminen tulisi jättää toissijaiseksi vaihtoehdoksi. (Sisäilmaluokitus 2018, 20.)

Rakennustuotteiden päästöluokitus määrittää vaatimukset työ – ja asuintiloissa käytettävien materiaalien osalta laadukkaan sisäilman varmistamiseksi. Vähäpäästöisten materiaalien

käyttö ei takaa hyvää sisäilmaa. Tarkoitus vähäpäästöisten materiaalien osalta on, että materiaalit eivät lisää ilmanvaihdon tarvetta. Ilman kierron on oltava riittävää, ja rakenneaineiden käyttö on suoritettava tuotetietojen mukaisesti. Vain muutamat materiaalit kestävät kosteissa olosuhteissa tai kiinnitettynä kosteaan pintaan. Rakenteen tulee olla vaivatta siivotävissä. (Sisäilmaluokitus 2018, 20.)

Rakennustuotteiden päästöluokitus on jaettu kolmeen tasoon; M1-päästöluokka luokitellaan parhaaksi, kun taas M3-luokkaan kuuluvat tuotteet eivät täytä M2-luokan vaatimuksia. Kokonaispäästöön vaikuttavat materiaalien määrä, sisäympäristön laatu (luokat S1 ja S2) sekä ilmanpitävyyden tavoitearvo, joka tulee olla $q_{50} \leq 1,0 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$. Parhaisiin S1 tai S2 luokkiin pyrkivässä on materiaalien M2 ja M3 luokkien käyttöä vähennettävä. (Sisäilmaluokitus 2018, 20.)

Luokkiin M1 ja M2 kuuluvat haihtuvuustestatut rakennusmateriaalit sekä päällystämättömät kalusteet, joiden päästö rajat on esitetty taulukossa 7.

Tutkittavat ominaisuudet	M1 [mg/m ³ h]	M2 [mg/m ³ h]
Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (TVOC) kokonaisemissio	< 0,2	< 0,4
Yksittäinen VOC µg/m ³	≤ EU-LCI	≤ EU-LCI
Formaldehydin (HCHO) emissio	< 0,05	< 0,125
Ammoniakin (NH ₃) emissio	< 0,03	< 0,03
(EC) No 1272/2008 -luokiteltujen CMR-yhdisteiden emissio	< 0,005	< 0,005
Hajun hyväksyttävyyys	+0,0	+0,0

Taulukko 7. Vaatimukset luokille M1 ja M2 rakennusmateriaalien osalta (Muokattu Sisäilmaluokitus 2018)

M3-luokkaan kuuluvat ne tuotteet, jotka ylittävät M2-luokan raja-arvot. Materiaaliyhdistelmien päästöluokat määräytyvät niissä käytettävien huonoimpien materiaalien mukaan. Esimerkiksi M1-luokan pinnoitteella käsitelty M2-luokan tuote luokitellaan M2-luokan mukaan, kunnes emissiomittauksilla todistetaan toisin pinnoitetun materiaalin päästöt. Vastaavasti M2-luokan pinnoitteella pinnoitettu M1-luokan materiaali on M2-luokan materiaali, kunnes toisin on todistettu. Materiaalinvalmistajalla tulee olla hyväksytty laadunvarmistusjärjestelmä. Jos materiaalin valmistusaineet tai prosessi muuttuu, on valmistajan uusittava emissiomittaus. (Sisäilmaluokitus 2018, 20.)

7.2 M1-luokitus rakennustuotteelle

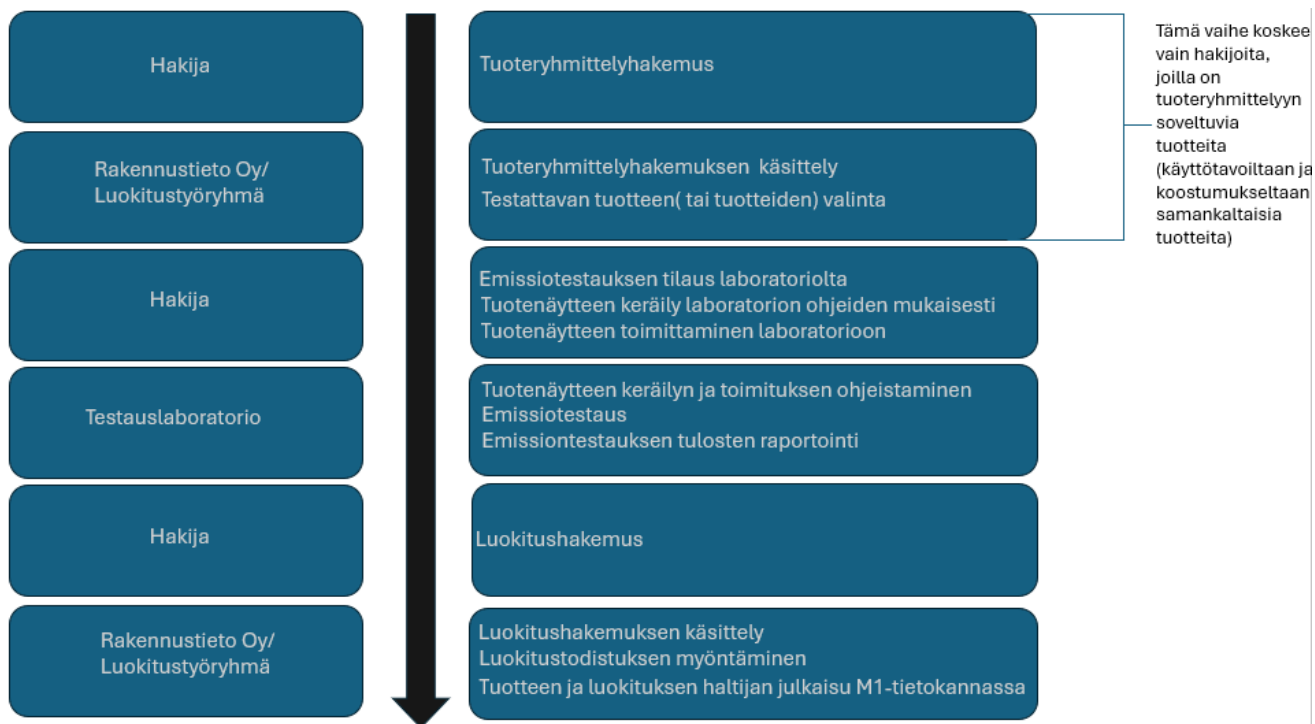
Rakennustieto Oy:ltä haetaan päästöluokitusta sähköisellä hakulomakkeella. Tuotetietojen lisäksi hakemukseen liitetään tuotteen tuotekortti tai -esite, käyttöohje, käyttöturvallisuustiedote (koskee ainoastaan kemiallisia tuotteita) ja testausraportti. Testausraportti ei saa olla vuotta vanhempi hakemuksen jättöhetkellä. Luokitushakemukset jätetään hakemusportaalien kautta ja puolueeton luokitustyöryhmä käsittelee ne luottamuksellisesti. Mikäli luokiteltavat tuotteet ovat samankaltaisia käytöltään sekä fysikaalisesti että kemiallisesti voidaan ne luokitella tuoteryhmäksi. Ennen testaus- ja luokitushakemusvaihetta tulee tehdä tuoteryhmittely, jotta työryhmä pystyy valitsemaan testattavan tuotteen kustannusten säätämiseksi. (Rakennustieto.)

Yrityksen, joka hakee luokitusta rakennusmateriaalille, tulee tehdä ennen hakemusta tuotteen testaus puolueettomassa ja rakennustiedon hyväksymässä laboratoriossa, Suomessa testauksen suorittaa Eurofins Expert Services Oy. Hakija sopii laboratorion kanssa testauksesta. Laboratorio ohjeistaa hakijaa tarvittavista näytekappaleista, sekä tuotepakkaus- ja toimitustavoista. Testaukseen liittyvistä kustannuksista testauslaitokselle vastaa aina hakija. Tuotteen valmistukseen ja tuotenäytteen keräilyyn liittyvät tiedot toimitetaan laboratoriolle. Laboratoriosta saatavalle näyteraportille tiedot ilmoittaa hakija. (Rakennustieto.)

Emissiotestaus perustuu M1-luokituksessa eurooppalaiseen harmonisoituun testistandardiin EN 16516 (Construction products: Assessment of release of dangerous substances. Determination of emissions into indoor air). Tuotteissa testataan seuraavat erikoispiirteet:

- VOC-yhdisteiden kokonaispäästöt (TVOC)
- EU-LCI-listan mukaiset orgaaniset haihtuvat päästöt (VOC)
- formaldehydi (HCHO) päästöt
- ammoniakki (NH_3) päästöt
- EY:n asetuksen nro 1272/2008 luokkiin Carc. 1A ja Carc. 1B kuuluvat syöpävaaralliset aineet
- hajun kelpoisuus.

Hakemuksen eteneminen esitetään kuviossa 2



Kuvio 2. Yhteenvedo M1-luokitusprosessista (Muokattu Rakennustieto)

Jos kyseessä on uusi tuoteluokitushakemus, siihen tulee liittää seuraavat tuotetiedot. Hakemuksessa jokainen tuote on nimettävä erilliseksi tuotteeksi.

- Jos tuotteita on alle 5, lisää ne hakemukseen yksitellen
- Jos tuotteita on yli 5, käytä massatuontia. Valitse tuotetietojen massatuonti, lataa Excel-pohja ja täytä ohjeiden mukaisesti.
- Huomaa, että saman tuotteen eri pakkauskooot eivät ole erillisiä tuotteita. Kirjoita kaikki tuotteen GTIN-koodit yhden tuotenimen kohdalle.
- Tuotekortti, käyttöohje tai tekninen esite
- Käyttöturvallisuusohje (kemialliset rakennustuotteet)
- M1-protokollan mukainen testausraportti tai raportit (enintään yhden vuoden vanha)

Jos tuotteen valmistustapa, koostumus tai muut päästöihin vaikuttavat tekijät eivät ole muuttuneet, M1-luokitukselle voi hakea jatkoa. Kolmen vuoden jälkeen tehtävässä jatkohakemuksessa tulee suorittaa samat toimenpiteet kuin uudessa hakemuksessa. Lisäksi vaaditaan tehtaan allekirjoittama ja päivätty selvitys tuotantoprosessin muutoksista edellisen M1-hakemuksen tai viimeisimpien laboratoriotestien jälkeen.

Kun hakemus on käsitelty, julkistetaan tuote/tuotteet rakennustiedon sivuilla <https://ymparisto.rakennustieto.fi/rakennusmateriaalien-paastoluokitus/rakennusmateriaalien-paastoluokitus-etsi-m1-paastouokiteltuja-tuotteita>

josta pystyy hakemaan yrityksen ja tuotteen nimellä päästöluokkaa. (Rakennustieto.)

8 VOC-päästöjen analyysi sorvaavassa teollisuudessa

8.1 Päästöjen lähteet ja mekanismit

Tutkimuksessa Evaluation of Parameters Influencing the VOC Emissions from Plywood havaittiin, että VOC-päästöjä syntyy tuotantoprosessien, kuten haudutuksen, kuivauksen ja puristuksen, seurauksena. Lämpötila vaikuttaa merkittävästi kaikkiin näihin prosesseihin: korkeammassa lämpötiloissa eri puulajien kokonais-VOC-päästöt (TVOC) vähenevät. (Ohlmeyer, M., Rohumaa, A., Antikainen, T. & Hughes, M. 2009.)

Tutkimuksessa todetaan päästöjen syntymisen välillä olevan eroja riippuen puulajista. Vähiten päästöjä tuotti koivu ja eniten männyn sydänpuu. Tutkimuksessa todetaan pidemmän haudutusajan ja korkeamman lämpötilan vaikuttavan VOC-päästöihin. Korkeammalla kuivaus- ja puristuslämpötilalla saadaan myös VOC-päästöjä vähennettyä. (Ohlmeyer, M et al. 2009).

Diplomityössä VOC Emissions and Control Techniques in Softwood Veneer Dryers todetaan, että viilun kuivaimet ovat merkittävin VOC-päästöjen lähde. Näiden päästöjä voidaan vähentää tehokkaasti kahdella tavalla: säätämällä tuotantoparametreja tai käyttämällä lisätyjä päästöjenhallintajärjestelmiä, jotka vähentävät ilmakehään vapautuvia päästöjä (Sabbah 2010).

A study of organic (1983) toteaa, että suurin osa kuivumispäästöistä syntyy puun uuteaineista, kuten terpeeneistä, hartseista ja rasvahapoista. Päästöjen tyyppi ja määrä riippuvat käytetyn kuivaimen tyypistä. Yksi pääasiallisista päästöihin vaikuttavista tekijöistä on kuivattavan puun tyyppi. Esimerkiksi kuusiviilun kuivaus voi tuottaa yli kolme kertaa enemmän päästöjä tuotantoyksikköä kohti verrattuna koivun kuivaamiseen. (Sabbah 2010.)

8.2 Vaihtelut prosessien välillä

Tutkimuksessa, jossa arvioitiin ympäristötekijöiden vaikutusta vanerin VOC-päästöihin nopealla havaitsemismenetelmällä, havaittiin, lämpötilan vaikuttavan kolmikerroksisen vanerin päästöihin enemmän kuin suhteellinen kosteus tai ilmanvaihtonopeus. Kolmikerroksisen vanerin VOC-päästöt johtuivat pääasiassa tuotteen pintakalvosta ja valmistusprosessista, erityisesti päällystykseseen käytetystä liimasta (Q. Wang, J. Shen, Y. Zhao, W. Liu, 2017).

Lisäksi tutkimus osoitti, että vanerin VOC-päästöt koostuivat pääasiassa aromaattisista hiilivedyistä, alkaaneista ja estereistä. Lämpötila oli merkittävin ympäristötekijä, sillä sekä lämpötilan, että suhteellisen kosteuden noustessa VOC-pitoisuudet kasvoivat. Sen sijaan suurempi ilmanvaihtuvuus ja lataustekijä vähensivät VOC-pitoisuuksia. (Wang J. et al., 2017.)

Tutkimuksessa todetaan, että VOC-päästöihin vaikuttavat useat tekijät, kuten prosessin virtaus, raaka- ja apuaineiden vaihtelut sekä puhdistuslaitosten tehokkuus. Lisäksi tutkimuksessa huomautetaan, että vaikka molemmat vertailtavat yritykset käyttävät liimanaan MUF-liimaa, liimamateriaalien koostumusanalyysi paljasti, että VOC-pitoisuudet vaihtelevat yritysten välillä. (Du W, Xie H, Li J, Guan X, Li M, Wang H, Wang X, Zhang X, Zang Q. 2024.)

8.3 Männyn vaikutus päästöihin verrattuna kuuseen tai koivuun

Tutkimuksessa käsittelemättömän ja lämpökäsitellyn puun päästämät haihtuvat orgaaniset yhdisteet todettiin olevan merkittäviä. Havupuut vapauttavat runsaasti VOC-yhdisteitä, jotka koostuvat pääasiassa terpeeneistä (70–90 %). Sen sijaan lehtipuiden, kuten koivun, VOC-päästöt ovat huomattavasti alhaisempia, jopa 50 kertaa pienempiä, koska ne eivät sisällä terpeenejä.

Lämpökäsitellyn puun modifiointitutkimuksessa havaittiin, että männystä vapautui 22 erilaista uuteainetta, kuten α -pineenia, 3-kareenia, limoneenia, β -pineenia, asetonia, heksanaalia, nonanaalia, β -myseenia, β -fellandreenia, terpinoleenia, isoterpinoleenia, kamfeenia, pentanaalia, asetaldehydia, propanaalia, butanaalia, etikkahappoa, heksaanihappoa, ketonihappoa, furfuraalia, metyylin-5-hepten-2-onia ja formaldehydia. Kuusesta puolestaan vapautui 21 erilaista uuteainetta, kuten α -pineenia, limoneenia, β -pineenia, 3-kareenia, asetonia, heksanaalia, α -terpineolia, sylvestreenia, β -karyofyleenia, γ -kadinienia, δ -kadiinia, β -fellandreenia, β -myseenia, pentanaalia, furfuraalia, etikkahappoa, heksaanihappoa, nonanaalia, tolueeniä, butanolia ja formaldehydia. Koivun kohdalla havaittiin vain kuusi uuteainetta: heksanaalia, pentanaalia, heksaanihappoa, etikkahappoa, etanolia ja formaldehydia. (Pohleven J, Burnard M, Kutnar A 2019.)

Alun perin korkeina olleet VOC-päästöjen pitoisuudet vähenivät huomattavasti kuivuessaan ja ajan myötä, laskien noin 50 % kahdessa viikossa. Lisäksi kuudessa päästöt laskivat nopeammin kuin männyssä. Sydänpuun ja pintapuun välillä havaittiin myös eroja: sydänpuu vapautti enemmän VOC-yhdisteitä kuin pintapuu. Männyn sydänpuu sisälsi 5–15 kertaa enemmän terpeenejä kuin pintapuu, kun taas kuusen pintapuu tuotti enemmän happo- ja karboksialdehydipäästöjä, kuin kuusen sydänpuu. Puussa olevat pihkataskut ja oksat voivat merkittävästi lisätä päästöjä, sillä ne toimivat haihtuvien terpeenien lähteinä. Esimerkiksi kuusen ja männyn oksat sisälsivät jopa 10 kertaa enemmän terpeenejä kuin pintapuu. (Pohleven J et al. 2019.)

9 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia menetelmiä, joilla voidaan vähentää männyn raaka-aineen VOC-päästöjä sorvaavassa puuteollisuudessa, sekä vähentää VOC-päästöjä niin tuotantoprosessissa kuin lopputuotteissakin. Työssä tarkasteltiin laajasti vanerin ja LVL valmistusprosesseja sekä niiden käyttökohteita. Samalla analysoitiin VOC-päästöjen lähteitä ja vähentämiskeinoja, ja otettiin huomioon kansalliset ja EU lainsäädännöt, jotka asettavat raja-arvot näille päästöille. Työn toimeksiantajana toimi Metsä Wood.

Vaikka aiempaa tutkimustietoa VOC-päästöistä on jonkin verran saatavilla, monet tutkimukset ovat vanhoja. Kirjallisuuskatsauksen ja aikaisempien tutkimusten perusteella todettiin kuitenkin, että VOC-päästöjen vähentämiseen on useita tehokkaita menetelmiä. Näihin kuuluvat prosessien optimointi, puun lämpökäsittely, sekä tekniikat kuten terminen ja katalyyttinen hapetus, biosuodatus sekä mikroaalto- ja radiotaajuustekniikka. Myös levyjen säilytysolosuhteilla on vaikutusta VOC-päästöihin. Märkäpesurit ovat yleisesti käytössä teollisuudessa ja osoittautuneet tehokkaiksi VOC-päästöjen hallinnassa.

Parhaat tulokset VOC-päästöjen vähentämiseksi saatiin tutkimuksessa haudonnan, kuivauksen ja puristuksen prosessimuutoksilla. Formaldehydipäästöt laskivat kymmenesosaan osaan nykyisistä raja-arvoista. Haudonnan lämpötilan nosto 20 °C - 70 °C vapautti enemmän formaldehydiä männyn pintapuusta sekä koivusta ja kuusesta valmistetuista levyistä. Kuivauslämpötilan nosto 140 °C-180 °C sekä puristuslämpötilan nosto 135 °C-180 °C vaikutti myös koivun ja männyn sydänpuun formaldehydipäästöihin. Mikroaalto- ja radiotaajuustekniikka osoittautuivat lupaaviksi: mikroaaltotekniikalla päästöjä pystyttiin vähentämään noin 80 %, ja radiotaajuustekniikalla 79 %. Mikroaaltotekniikan hyvä puoli on, että puun kosteus ei vähene prosessin aikana. Koska testit tehtiin puulastuilla, tarvitaan lisätutkimusta sen soveltuvuudesta viulun käsittelyyn.

Eettisesti on tärkeää, että VOC-päästöjä tutkitaan ja on myönteistä, että nyt on herätty siihen, miten nämä päästöt aiheuttavat terveydellisiä ja ympäristöllisiä ongelmia. Valmistajilla on vastuu varmistaa, että heidän tuotteensa ovat vähäpäästöisiä.

Tulevaisuudessa ligniinipinnoitteet voivat olla lupaava vähäpäästöinen vaihtoehto vanerin pinnoittamiseen. Lisäksi prosessien optimoinnin ja Teollisuus 4.0 -teknologioiden vaikutusta VOC-päästöjen vähentämiseen olisi syytä tutkia tarkemmin. Lämpökäsittelyn menetelmien ja parametrien osalta suosittelemme lisää tutkimusta, erityisesti siitä, miten ne vaikuttavat puun fysikaalisiin ominaisuuksiin. Mikroaalto- ja radiotaajuustekniikoiden kehittämistä ja niiden vaikutuksia viulun käsittelyssä pitäisi tutkia laajemmin. Jatkotutkimuksissa olisi tärkeää myös selvittää, miten pitkäaikainen altistuminen pienille pitoisuuksille vaikuttaa terveyteen.

Lisäksi olisi hyödyllistä arvioida näiden uusien tekniikoiden ja prosessien kustannusvaikutuksia investointien, hyödyn ja käytön osalta.

Lähteet

Adamová T, Hradecký J, Pánek M. 2020. Volatile Organic Compounds (VOCs) from Wood and Wood-Based Panels: Methods for Evaluation, Potential Health Risks, and Mitigation Viitattu 12.9.2024. Saatavissa <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33036167/>

Banerjee S, Connors T. 2007. Implementing Strategies for Drying and Pressing Wood Without Emissions Controls. Viitattu 8.9.2024 Saatavissa <https://www.osti.gov/biblio/913620?>

Christensen, E. R. 2014. Physical and chemical processes in the aquatic environment. Hoboken, New Jersey: Wiley, 221-223.

Du W, Xie H, Li J, Guan X, Li M, Wang H, Wang X, Zhang X, Zang Q. 2024. The Emission Characteristics of VOCs and Environmental Health Risk Assessment in the Plywood Manufacturing Industry: A Case Study in Shandong Province. Viitattu 3.9.2024 Saatavissa <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/17/7350>

EPA. 2024. What are volatile organic compounds (VOCs). Viitattu 9.7.2024. Saatavissa <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-are-volatile-organic-compounds-vocs>

EU Commission. 2024. EU-LCI values. Viitattu 5.8.2024. Saatavissa https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/construction/eu-lci-subgroup/eu-lci-values_en

EUR-LEX. 2004. Directive 2004/42/CE. Viitattu 5.8.2024. Saatavissa <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2004/42/oj>

Halios C, Landeg-Cox C, Lowther S, Middleton A, Marczylo T, Dimitroulopoulou S 2022. Chemicals in Europe residences – Part I: A review of emissions, concentrations and health effects of volatile organic compounds (VOCs). Science of the Total environment. Viitattu 14.7.2024 Saatavissa <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.saimia.fi/science/article/pii/S0048969722032983?via%3Dihub>

Henn K, Forsman N, Zou T, Österberg M. 2021. ACS Publications. Colloidal Lignin Particles and Epoxies for Bio-Based, Durable, and Multiresistant Nanostructured Coatings. Viitattu 28.8.2024. Saatavissa <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.1c06087#>

Jia L, Chu J, Li J, Ren J, Huang P, Li D. 2020. Formaldehyde and VOC emissions from plywood panels bonded with bio-oil phenolic resins. Science direct. Viitattu 1.8.2024 Saatavissa <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.saimia.fi/science/article/pii/S026974912031006X?via%3Dihub>

Kekki, M. 2018. The Plywood Industry Today. Teoksessa Varis, R. (toim.) Wood-based

panels industry. Jyväskylä: Kirjakaari Oy, 35–106.

Liski, K. 2018. LVL Industry. Teoksessa Varis, R. (toim.) Wood-based panels industry. Jyväskylä: Kirjakaari Oy, 161–195.

Liu Y, Zeng C, Wang M, Shao X, Yao Y, Wang G, Li Y, Hou M, Fan L, Ye D. 2023. Characteristics and environmental and health impacts of volatile organic compounds in furniture manufacturing with different coating types in the Pearl River Delta. Journal of Cleaner Production. Viitattu 3.9.2024 Saatavissa <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.saimia.fi/science/article/pii/S0959652623007576>

Józwiak, M. Czajka, M. 2013 Investigation of VOC emissions from pine plywood. Viitattu 29.8.2024 Saatavissa <https://bibliotekanauki.pl/articles/9519.pdf>

Mengting G, Yongli Z, Yifanzi Z, Jintian G, Qin Z. 2023. Effects of Air Exchange Rate on VOCs and Odor Emission from PVC Veneered Plywood Used in Indoor Built Environment. Coatings. Viitattu 28.7.2024. Saatavissa <https://web-p-ebscohost-com.ezproxy.saimia.fi/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=0&sid=f8b56550-cbf1-4105-b0c5-c32abf0aef73%40redis>

Metsä Group. a. Yritysrakenne. Viitattu 18.6.2024. Saatavissa <https://www.metsagroup.com/fi/tietoa-metsa-groupista/tietoa-meista/yritysrakenne/>

Metsä Group. b. Liity jäseneksi. Viitattu 18.6.2024. Saatavissa <https://www.metsagroup.com/fi/puunhankinta/omistajajasen-edut/liity-omistajajaseneksi/>

Metsä Group. c. Me olemme Metsä Groupin puun hankinta. Viitattu 18.6.2024. Saatavissa <https://www.metsagroup.com/fi/puunhankinta/>

Metsä Group. d. Metsä Wood. Viitattu 18.6.2024. Saatavissa <https://www.metsagroup.com/fi/metsawood/metsa-wood/>

Metsä Group. e. Me olemme Metsä Fibre. Viitattu 18.6.2024. Saatavissa <https://www.metsagroup.com/fi/metsafibre/metsafibre/>

Metsä Group. f. Euroopan johtava korkealaatuisten ensikuitukartonkien valmistaja. Viitattu 18.6.2024. Saatavissa <https://www.metsagroup.com/fi/metsaboard/metsa-board/tietoa-meista/metsa-board-lyhyesti/>

Metsä Group. g. Metsä Tissue Yhtiönä. Viitattu 18.6.2024

<https://www.metsagroup.com/fi/metsatissue/metsatissue/>

Metsä Group. h. Me olemme Metsä Spring. Viitattu 18.6.2024

<https://www.metsagroup.com/fi/metsaspring/>

Metsä Wood. 2022b. Environmental Product Declaration. Viitattu 4.7.2024. Saatavissa

<https://www.metsagroup.com/globalassets/metsa-wood/attachments/kerto-lvl-manual/en/kerto-manual-lvl-manufacturing.pdf>

Ohlmeyer, M., Rohumaa, A., Antikainen, T. & Hughes, M. 2009. Evaluation of Parameters Influencing the VOC Emissions from Plywood. Viitattu 4.9.2024. Pdf-dokumentti. Ei saatavilla.

Pohleven J, Burnard M, Kutnar A. 2019. Volatile Organic Compounds Emitted from Untreated and Thermally Modified Wood. Wood and Fiber Science. Viitattu 21.8.2024 Saatavissa <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/2863/2536>

Rakennustieto. 2024. Rakennusmateriaalien päästoluokitus. Viitattu 29.7.2024 Saatavissa <https://ymparisto.rakennustieto.fi/rakennusmateriaalien-paastoluokitus#Mik-on-M1>

Ramos-Maldonado M, Aguilera-Carrasco C. 2021. Trends and Opportunities of Industry 4.0 in Wood Manufacturing Processes Viitattu 30.8.2024 Saatavissa <https://www.intechopen.com/chapters/78055>

Sabbah, J. 2010. VOC Emissions and Control Techniques in Softwood Veneer Dryers. Master's Thesis. Lappeenranta University of Technology. Viitattu 22.8.2024. Saatavissa <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/63174/nbnfi-fe201006041968.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Sisäilmastoluokitus. 2018. RT-07-11299. Viitattu 3.8.2024 Saatavissa <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%2007-11299>

Sjöström, E. 1993. Wood Chemistry: Fundamentals and applications. Academic press, inc. 1–92.

Tarvainen, I. 2018. End-uses of Plywood. Teoksessa Varis, R. (toim.) Wood-based panels industry. Jyväskylä: Kirjakaari Oy, 149-160.

Työterveyslaitos. a. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyypisissä

työympäristöissä. Viitattu 19.7.2024 Saatavissa https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/140940/TTL_978-952-261-957-0.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Työterveyslaitos. b. Terveydellisen merkityksen arviointi sisäilmatilanteissa. Viitattu 7.8.2024 Saatavissa <https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/145308/TTL-978-952-391-047-8.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Wang Q, Shen J, Zhao Y, Liu W. 2017. Influence of Environmental Factors on Volatile Organic Compound Emissions from Plywood Tested by a Rapid Detection Method. Forest Products Journal Viitattu 23.08.2024 Saatavissa <https://www.proquest.com/docview/1897267360?accountid=202350&parentSessionId=m5KiBrFotL1ldQe3s%2Fsx9HswwdmNmKmu2FLSprUCJrA%3D&parentSessionId=ov12syXQOcOSC%2BK2bLL6fQhkJRWA2JgfWY0tJwoXE%2B8%3D&pq-origsite=primo&sourcetype=Scholarly%20Journals>

Ympäristö.fi. 2023. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (NMVOC). Viitattu 9.7.2024 Saatavissa <https://www.ymparisto.fi/fi/saasteettomuus-ja-ymparistoriskit/ilmansuojelu/haihtuvat-orgaaniset-yhdisteet>