LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
Kandidaatintyö

PUUN KÄYTÖN LISÄÄMISEN VAIKUTUKSET KERROS-TALORAKENTAMISEN ENERGIANKULUTUKSEEN JA HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖIHIN

The effect of increased wood use in multi-story buildings on energy consumption and carbon dioxide emissions

Työn tarkastaja: Tutkijaopettaja, TkT Mika Luoranen
Työn ohjaaja: Laboratorioinsinööri, TkL Simo Hammo

Lappeenrannassa 13.3.2017

Mari Roininen

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO 3
1.1 Taustaa puukerrostaloista 3
1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset 4
2 PUUKERROSTALORAKENTAMINEN SUOMESSA 6
2.1 Puukerrostalorakenteet 6
2.2 Puukerrostalorakentamista rajoittavia tekijöitä 7
2.3 Puukerrostalorakentamisen edistäminen Suomessa 8
3 ENERGIANKULUTUKSEN VERTAILU 10
3.1 Betonin ja sahatavaran valmistus ja energiankulutus sekä kuljetukset 10
3.2 Kerrostalorakenteiden valmistuksen, kuljetuksen ja purkuvaiheen energiankulutus 12
3.3 Rakenteiden termisen massan vaikutus käyttövaiheen energiankulutukseen 15
4 HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖJEN VERTAILU 19
5 VERTAILUJEN TULOKSET JA POHDINTA 24
6 YHTEENVETO 29
LÄHTEET 31

1 JOHDANTO

Puurakentamisella tavoitellaan rakennetun ympäristön pienempää energiankulutusta ja kasvihuonekaasupäästöjä. Suomen energia- ja ilmastostrategian tavoitteita ovat uusiutuvan energiantuotannon lisääminen, kasvihuonekaasupäästöjen pienentäminen ja pitkällä aikavälillä hiilineutraali energiantuotantojärjestelmä ja yhteiskunta. Suurin osa kasvihuonekaasupäästöistä Suomessa muodostuu energiantuotannossa, ja rakennusten osuus energian loppukäytöstä on noin 38 %. (Huttunen (toim.) 2017, 13, 34, 60, 61.)

1.1 Taustaa puukerrostaloista

Puukerrostalolla tarkoitetaan kaksi- tai useampi kerroksista asuinkerrostaloa, jonka kantavat rakenteet ovat pääosin puisia. Rakennuksen verhoilu voi olla valmistettu muista materiaaleista. Kellarirakenteet ja perustukset ovat puukerrostaloissa samankaltaiset kuin betonirakenteisten kerrostalojen, mutta puurakennusten keveys on otettava huomioon perustuksissa. Puukerrostalon maavarainen alapohja on betonirakenteinen, mutta tuulettuvassa alapohjarakenteessa voidaan käyttää myös puuta. (Tolppanen et al. 2013, 10, 52-53.) Joissain ratkaisuissa puukerrostalon koko ensimmäinen kerros on betonirakenteinen (Puuinfo 2017).

Nykyaikaisen puukerrostalon kantavat rakenteet rakennetaan teollisesti esivalmistetuista elementeistä suurelementti-, tilaelementti- ja pilari-palkkitekniikalla (Kryssi 2013, 82). Useimmissa Suomessa valmistuneissa puukerrostaloissa on käytetty kantaviin seiniin perustuvaa tekniikkaa eli suurelementtitekniikkaa tai tilaelementtitekniikkaa, jossa rakennuselementit valmistetaan tehtaalla mahdollisimman pitkälle (Puuinfo 2017). Hyväksi esimerkiksi puukerrostalosta sopii Viikin Latokartanon puukerrostalokorttelin kerrostalo (Kuva 1). Sen kantavat rakenteet on rakennettu pilari- ja palkkitekniikalla, ja rakennuksen ulkoverhous on myös puinen (Puuinfo 2017).

Kuva 1. Puurakenteinen kerrostalo Viikin Latokartanon puukerrostalokorttelissa Helsingissä.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset

Tämän kandidaatintyön tavoite on selvittää, millaisia vaikutuksia kantavien rakenteiden materiaalivalinnalla on kerrostalorakennuksen energiankulutukseen ja hiilidioksidipäästöihin. Työssä esitetään tulokset vertailusta, jonka kohteena ovat kerrostalon elinkaaren aikaiset hiilidioksidipäästöt ja energiankulutus. Vertailtavissa kerrostaloissa kantavat rakenteet ovat pääosin joko puuta tai betonia. Vertailu on tehty julkaistun materiaalin ja tutkimusartikkelien perusteella.

Ympäristövaikutusten vertailuosassa kerrostalon hiilidioksidipäästöjä ja energiankulutusta verrataan valittujen kirjallisuuden arvojen perusteella. Vertailussa huomioidaan rakennusmateriaalien valmistuksen, rakennusmateriaaleihin liittyvät käytön aikaiset ja rakennusmateriaalien purkamisen ja loppukäsittelyn aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ja energiankulutus.

Tässä työssä vertaillaan pääasiassa ruotsalaisia tutkimuksia, joissa esimerkkikohteena on Wälludden-niminen rakennus Etelä-Ruotsissa. Ruotsalaiset tutkimukset on valittu siksi, että ruotsalainen rakentamistyyli, ilmasto, rakennusmateriaalien tuotantoketju ja rakentamismääräykset ovat lähellä suomalaisia ja tutkimusten tuloksia voidaan paremmin soveltaa Suomen oloihin.

Wälludden on vuonna 1996 pilottiprojektina Växjoon rakennettu asuinkerrostalo (Frantz 2008, 7). Wälludden on nelikerroksinen, siinä on 16 asuntoa ja sen lämmitetty kokonaispinta-ala on 1190 m^2 (Dodoo et al. 2012, 463). Wälluddenia on käytetty esimerkkitapauksena muun muassa Växjon ja Lundin yliopistojen tutkijoiden tekemissä tutkimuksissa. Suurin osa suomalaisista asuinkerrostaloista on samaa kokoluokkaa Wälluddenin kanssa eli 3-9 kerroksisia (Suomen virallinen tilasto 2016 c, 9).

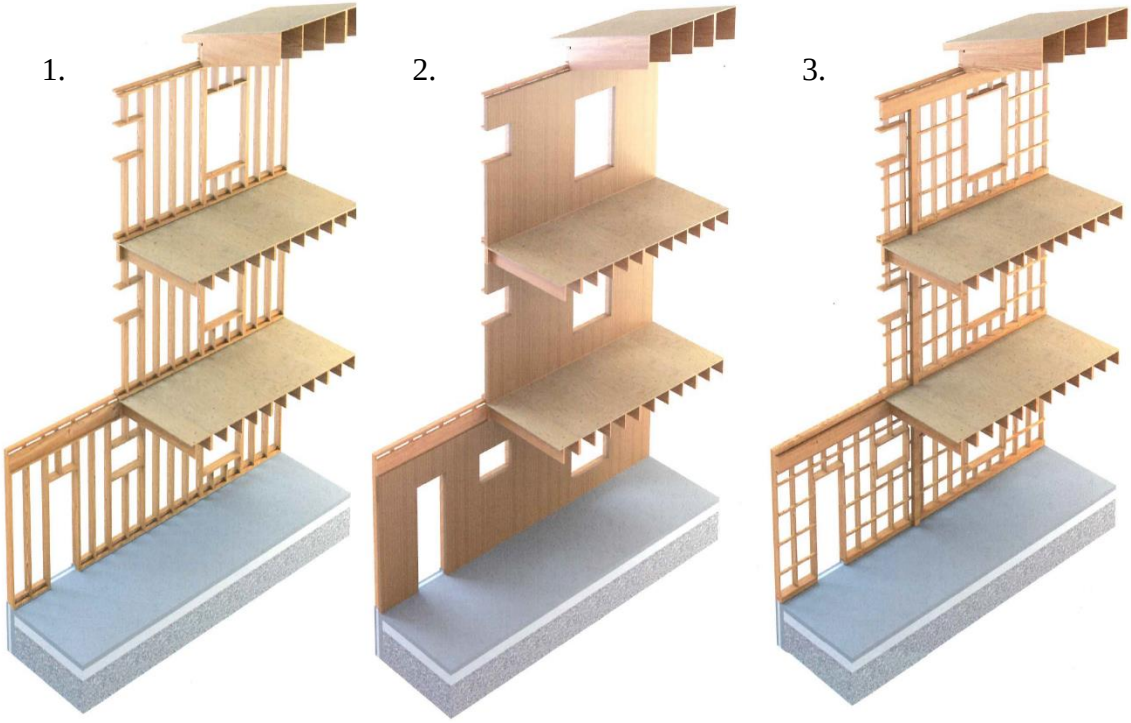
2 PUUKERROSTALORAKENTAMINEN SUOMESSA

Suomessa on valmistunut yhteensä 52 puukerrostaloa vuosina 1996-2016 (Puuinfo 2016). Asuinkerrostaloja valmistui yhteensä vuosina 1990-2015 vuosittain noin 500-800 kappaletta (Suomen virallinen tilasto 2016 b). Puurakenteisten kerrostalojen määrä on murto-osa kaikista asuinkerrostaloista, joita Suomessa on 59 499 kappaletta (Suomen virallinen tilasto 2016 c, 8). Puu on siis erittäin harvinainen rakennusmateriaali asuinkerrostalojen kantavissa rakenteissa. Muissa rakennuksissa, etenkin muissa asuinrakennuksissa, puu taas on yleisin rakennusmateriaali (Suomen virallinen tilasto 2016 c, 10).

2.1 Puukerrostalorakenteet

Suurelementtirakenteisen kerrostalon kantavat seinät valmistetaan joko rankarakenteisista suurelementeistä tai ristiinliimatuista massiivipuulevyistä (Kuva 2). Rankarakenteisten suurelementtien seinät rakennetaan liima- tai kertopuisista runkotolpista, jotka yhdistetään ylä- ja alasidepuilla sekä levytyksellä. Massiivipuulevyjä voidaan käyttää seinien, välipohjien ja kattojen rakenteissa, tai vaihtoehtoisesti välipohjissa voidaan käyttää ripalaattarakennetta. Kumpaankin kantavat seinät -rakenteeseen perustuvat rakennuselementit voidaan halutessa valmistaa tehtaalla erittäin pitkälle, jolloin työmaalla tehdään vain elementtien paikalleen asennus. (Tolppanen et al. 2013, 40-45.) Rakennusmenetelmän etuja ovat joustavuus tilasuunnittelussa ja muita tekniikoita laajempi rakentamiskokemus Suomessa, mutta ongelmana on kerroksittaisesta rakentamisesta johtuva rakenteiden suojauksen tarve sääoloilta rakennustyömaalla (Kryssi 2013, 63-64).

Pilari- ja palkkijärjestelmässä kantava rakenne koostuu liima- tai kertopuisista pilareista ja palkeista, joiden varaan välipohjat asennetaan (Kuva 2). Välipohjarakenne on yleensä rankarakenteinen suurelementti. Pilari- ja palkkijärjestelmällä rakennettavan kerrostalon rakennusaika on elementtirakentamista pidempi työmaalla, mutta ulkoseinät ja asunnot voidaan suunnitella joustavasti ja muuttaa myöhemmin tarpeen mukaan. (Tolppanen et al. 2013, 46-47.) Pilari- ja palkkijärjestelmällä rakennuksen tilasuunnittelu on joustavaa, mutta menetelmää käytettäessä rakennustyömaalla tehtäväksi jäävät sisätyöt ja rakennuksen jäykistyksen suunnittelu on haastavaa (Kryssi 2013, 73-74).



Kuva 2. Puukerrostalon yleisimmät kantavat rakenteet havainnekuvina (muokattu lähteestä: Tolppanen et al. 2013, 41, 43, 46). 1. Rankarakenne, 2. Massiiviliimapuurakenne, 3. Pilari- ja palkkirakenne. Kuvien välipohjissa on ripalaattarakenteet.

Elementtirakentaminen on viety pisimmälle tilaelementtirakentamisessa. Tilaelementit ovat tehtaalla valmistettuja valmiita rakennuksen osia, jotka kootaan työmaalla kokonaisuudeksi. Tilaelementtien kantavat seinät rakennetaan rankarakenteisista suurelementeistä tai ristiinliimatusta massiiviliimapuusta. (Tolppanen et al. 2013, 48.) Teollinen esivalmistus on tilaelementtitekniikassa johtaa tehokkuuteen niin materiaalien kuin ajan käytössä, mutta aiheuttaa myös muita tekniikoita suurempia rajoitteita tilasuunnittelulle (Kryssi 2013, 68-69).

2.2 Puukerrostalorakentamista rajoittavia tekijöitä

Puun käyttöä kerrostalorakentamisessa ovat rajoittaneet paloturvallisuuteen liittyvät rakentamismääräykset. Vuonna 2011 uusi rakentamismääräyskokoelman osa E1 Rakennusten paloturvallisuus astui voimaan (E1 Suomen rakentamismääräyskokoelma 2011, 1). Rakentamismääräysten muutokset perustuvat Ympäristöministeriön tilaamaan ja 2010 valmistuneeseen Puurakentamisen asema rakentamismääräyksissä -raporttiin (Ympäristöministeriö 2011, 1).

Puurakentamisen asema rakentamismääräyksissä -raportissa todettiin, että eniten puurakentamista aiheettomasti rajoittivat paloturvallisuuteen kohdistuvat rakentamismääräykset. Merkittävin kehityskohta puurakenteisten kerrostalojen kannalta olivat luokkiin ja lukuarvoihin perustuvan paloteknisen suunnittelun laajentaminen. Uudisrakentamisessa vaatimuksia laajennettiin koskemaan enintään 8-kerroksisia tai 26 metriä korkeita asuin- ja työpaikkarakennuksia aikaisemman enintään 4-kerroksisia koskevan määräyksen sijaan. Vaatimukset laajennettiin koskemaan myös enintään 7-kerroksisen asuin- tai työpaikkarakennuksen lisäkerroksen rakentamista. Paloturvallisuusvaatimusten mukaisia ratkaisuja olisivat automaattinen sammutusjärjestelmä, rakenteelliset palosuojaukset ja palamattomat eristeet. (Jantunen et al. 2010, 7-8.)

Puukerrostalorakentamisen laatua ja kustannustehokkuutta voidaan lisätä kehittämällä rakennusprosessia. Puurakentamiselle ja -rakennustuotteille laaditut standardit ovat edellytys alan eri toimijoiden yhteistyölle. Teollisella tuotannolla saadaan pitkälle esivalmistettuja, tasalaatuisia ja yhteensopivia rakennuselementtejä, joiden liittäminen toisiinsa rakennuspaikalla on nopeaa. Rakentamisosapuolten tiiviin ja pitkäaikaisen yhteistyön kautta voidaan muodostaa hyviä toimintamalleja ja välttää virheitä. (Kryssi 2013, 81-82.) Puurakentamisen edistämisen kannalta tärkeää on myös vaativaan rakennesuunnitteluun valmistava syvällinen ja korkeatasoisen koulutus (Jantunen 2010, 9).

2.3 Puukerrostalorakentamisen edistäminen Suomessa

Viime aikoina Suomessa puu on lisännyt merkitystään suurimittakaavaisessa rakentamisessa, kuten asuinkerrostaloissa, ja kehityksen ennustetaan jatkuvan (Loukasmäki 2016, 23). Puun käyttöä rakentamisessa halutaan lisätä, koska siitä valmistettujen rakennustuotteiden hiilidioksidipäästöt ja energiankulutus ovat alhaisemmat kuin muilla rakennusmateriaaleilla, kuten betonilla, kivellä ja teräksellä. Rakennustuotteiden valmistaminen puusta kuluttaa yleensä vähemmän energiaa kuin muista materiaaleista. Puu on uusiutuva raaka-aine, ja puun kasvussa sitoutunut hiili säilyy käyttöiän ajan varastoituna puutuotteessa. Metsäteollisuuden sivuvirtoina muodostuu paljon uusiutuvaa polttoainetta, jota voidaan käyttää energiantuotannossa fossiilisten polttoaineiden sijaan. (Julin et al. 2010, 3-5.)

Puurakentaminen on otettu huomioon Työ- ja elinkeinoministeriön (TEM) hankkeiden tavoitteissa. Vuosina 2011-2015 TEM:n hanke oli Metsäalan strateginen ohjelma (MSO). Yksi MSO:n päätavoitteista oli puukerrostalojen rakentamisen lisääminen ja vuonna 2015 hankkeen loppuraportissa arvioitiinkin puukerrostalorakentamisen nousevan hankkeen aikana tavoiteltuun 10 % markkinaosuuteen kerrostalorakentamisesta. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2015, 3-5.)

TEM, yhteistyössä muiden ministeriöiden kanssa, on jatkanut metsäalan ja biotalouden edistämistä MSO:n jälkeen toteuttamalla vuonna 2014 määriteltyä Suomen biotalousstrategiaa. Biotalousstrategian tavoitteena on tuottaa talouskasvua ja liiketoimintaa, joka perustuu uusiutuvan biomassan kestävään käyttöön. Suurimittakaavainen puurakentaminen on nostettu esiin myös biotalousstrategiassa osana uutta liiketoimintaa, joka hyödyntää biotalouden tuotteita, kuten biopohjaisia puutuoteteollisuuden ja rakennusteollisuuden tuotteita sekä biomassasta tuotettavaa energiaa. (Biotalous 2014, 3, 14.)

Kysyntää suomalaisille puukerrostalotuotteille ja rakentamisosaamiselle voisi olla kotimaan rakennusteollisuuden lisäksi myös ulkomailla. Puutuotteet soveltuvat keveytensä ansiosta myös vientituotteeksi, mutta tällä hetkellä sahatavaraa pidemmälle jalostetuista puutuotteista vain ovet ja hirsitalot ovat merkittäviä vientituotteita (Loukasmäki 2016, 23). Pitkälle jalostetuista puutuotteista toivotaan uutta kasvavaa vientialaa, mutta vielä puutuotteiden vientiä ei ole onnistuttu kasvattamaan toivotulla tavalla (Työ- ja elinkeinoministeriö 2015, 4-5).

3 ENERGIANKULUTUKSEN VERTAILU

Rakennuksen energiankulutus koostuu rakennusmateriaalien valmistukseen, kuljetukseen, rakentamiseen ja purkamiseen tarvittavasta energiasta sekä käyttövaiheessa kulutetusta energiasta. Käyttövaiheessa rakennuksen energiankulutukseen kuuluu esimerkiksi rakennuksen lämmitysenergia ja sähkönkulutus muun muassa valaistuksessa. Rakennuksen eri elinkaaren vaiheisiin liittyy useita toimenpiteitä, joissa kuluu lämpöenergiaa, sähköä ja polttoaineita (Kuva 3).

RAKENNUSVAIHE
- Raaka-aineiden hankinta
- Rakennusmateriaalien valmistus
- Raaka-aineiden ja rakennusmateriaalien kuljetus
- Rakentaminen
- Rakennusjätteiden käsittely

KÄYTTÖVAIHE
- Tilojen lämmitys
- Käyttöveden lämmitys
- Sähkönkulutus rakennuksessa
  - käyttäjästä riippuvainen, esim. kodinelektroniikka
  - käyttäjästä riippumaton, esim. peruslämmitys ja -ilmastointi
- Rakennuksen korjaus ja remontointi

PURKUVAIHE
- Rakennuksen purkaminen
- Purkujätteiden käsittely

Kuva 3. Energiaa kuluttavia toimenpiteitä rakennuksen eri elinkaarenvaiheissa.

3.1 Betonin ja sahatavaran valmistus ja energiankulutus sekä kuljetukset

Betonin valmistuksen energia- ja päästöintensiivisin vaihe on sementin valmistus. Suurin osa eurooppalaisesta sementistä valmistetaan kuivaprosessilla, jossa yhden sementtikilogramman valmistamiseen tarvitaan 2640 kJ lämpöenergiaa, joka tuotetaan polttamalla 78,8 g hiiltä. Lisäksi jauhatusmyllyissä ja poistopuhaltimissa käytetään sähköä. (Delgado Sancho et al. 2013, 4, 44, 49.) Tavallisen betonin painosta 8-16 % on sementtiä (Betoniteollisuus ry a).

Betonin massasta suurin osa on hiekkaa, joka on uusiutumaton luonnonvara. Suomessa kaivetaan vuosittain 120 miljoonaa tonnia kalliota, soraa tai hiekkaa ja se on kaivannaisteollisuuden suurin sektori. Yleensä kiviaines betonin valmistusta varten hankitaan mahdollisimman läheltä rakennuspaikkaa, mutta kasvukeskusten läheisyydessä soran ja hiekan saanti on jo vaikeutunut ja kuljetusmatkat pidentyneet. (Lahtinen et al. 2010, 9.) Hiekan tarvetta voi vähentää kierrättämällä rakennuksesta purettua betonia uuden valmistamiseen (Börjesson ja Gustavsson 2000, 579).

Sahatavaran valmistuksessa tuotettua sahatavarakuutiota kohden sähköä kuluu 77 kWh ja lämpöä 339 kWh. Tärkein vaihe on kuivatus, jossa kuluu noin 40 % sähköstä ja 88 % lämmöstä. Seuraavaksi eniten energiaa kuluu sahauksessa, noin 30 % sähköstä ja 3 % lämmöstä. (Anderson et al. 2013, 892.)

Rakennusmateriaalien ja niiden raaka-aineiden kuljetukset ovat merkittävä osa tavaraliikennettä ja etenkin maantieliikennettä, ja siten liikenteen polttoaineiden kulutusta. Suomessa betoniteollisuuden tuotteita kuljetetaan pääasiassa maanteitse (Betoniteollisuus ry b), ja kotimaisen puun kaukokuljetuksista noin kolme neljäsosaa oli maantiekuljetuksia, 22 % rautatiekuljetuksia ja 3 % vesiteitse (Metsäntutkimuslaitos 2014, 170).

Tilastokeskuksen vuoden 2015 maanteitä koskevien tietojen mukaan mekaanisen metsäteollisuuden tuotteiden, kuten sahatun puutavaran, levytuotteiden ja puisten taloelementtien, paino-osuus teillä kuljetetusta tavaramäärästä oli 2,0 % ja lisäksi tukki- ja kuitupuun painoosuus oli 11,1 % ja energiapuun 1,4 %. Samojen tuoteryhmien kuljetussuoritteiden eli tavarapainon ja kuljetusmatkan tulojen osuudet olivat 4,4 %, 12,8 % ja 0,9 %. Mekaanisen metsäteollisuuden tuotteiden keskimääräinen kuljetusmatka maantiellä oli 119 km, tukki- ja kuitupuun 99 km ja energiapuun 40 km. (Suomen virallinen tilasto 2016 a, 9, 11.)

Rakennusmateriaalien, kuten betonin, tiilten ja sementin, paino-osuus teillä kuljetetusta tavaramäärästä oli 4,5 % ja maa-ainesten, kuten soran ja hiekan, osuus 37,0 % sekä lisäksi metallirakenteiden osuus 0,8 %. Osuudet kuljetussuoritteista samoilla tuoteryhmillä olivat 5,4 %, 9,6 % ja 1,4 %. Betonin, sementin ja samantapaisten rakennusmateriaalien keskimääräinen kuljetusmatka oli 69 km, maa-ainesten 19 km ja metallirakenteiden 100 km. (Suomen virallinen tilasto 2016 a, 9, 11.)

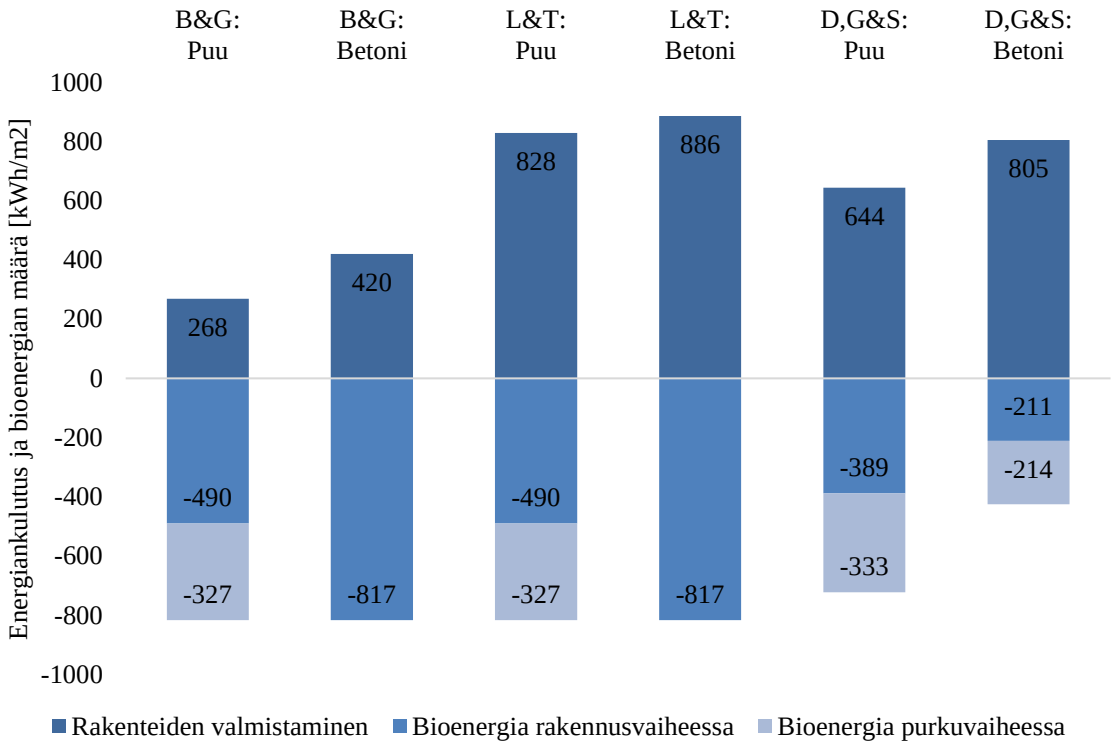
Rakennuskohtaisten rakennusmateriaalien kuljetusmääriin vaikuttaa käytettävien rakennusmateriaalien paino. Tilastotiedoissa ei ole eritelty kuljetettavia rakennustuotteita tarkan käyttötarkoituksen mukaan, ja sekä puurakenteisessa että betonirakenteisessa kerrostalossa käytetään niin puu- kuin betonipohjaisia rakennusmateriaaleja. Puurakenteinen rakennus on kuitenkin betonirakenteista kevyempi, jolloin käytetään ja kuljetetaan painoltaan vähemmän rakennusmateriaaleja. VTT:n rakennusmateriaalien ympäristövaikutuksia arvioivassa raportissa määritettiin massa asuinkerrostalolle, joka edustaa nykyistä suomalaista rakentamistapaa. Tarkasteltavassa kerrostalossa on kuusi kerrosta ja kerrosala on 2454,5 m^2. Tyypillisiä

betonirakenteita käyttämällä rakennuksen kokonaismassa oli 4390 t, josta runkorakenteita oli 2635 t. Kevytrakenteisen, pilari- ja palkkitekniikkaa edustavan kerrostalon kokonaismassa oli 1870 t, josta runkorakenteita oli 1155 t. (Ruuska ja Häkkinen 2013, 6-7, 25-26, 32, 57)

3.2 Kerrostalorakenteiden valmistuksen, kuljetuksen ja purkuvaiheen energiankulutus

Puu- ja betonirakenteisen kerrostalon rakennusmateriaalien valmistuksessa, kuljetuksessa ja purkuvaiheessa tarvittavan energian määrä on laskettu vertailuun valituissa kolmessa eri tutkimuksessa (Kuva 4). Lisäksi vertaillaan eri tutkimuksissa sivutuotteena puurakenteiden valmistuksessa ja purkuvaiheessa tuotetun bioenergian määrä (Kuva 4). Energiankulutusta kuvaa positiivinen tummin sininen pylväs ja bioenergian määrää negatiivinen pylväs. Osa bioenergiasta sitoutuu rakennuksen puurakenteisiin ja on käytettävissä energiantuotantoon vasta rakennuksen purkuvaiheessa. Bioenergia voidaan käyttää rakennusmateriaalien valmistuksessa energiantarpeen täyttämiseen ja tarvittava lisäenergia tuotetaan muilla tavoin.

Energiantarpeen ja sivutuotteena saatavan bioenergian määrä eri laskelmien välillä vaihtelee paljon, vaikka eri laskelmissa kohde on ollut sama kerrostalo (Kuva 4). Eri laskentatapojen lähtökohdissa ja laskennassa huomioitavissa tekijöissä on eroja. Yhteistä eri tuloksille on puurakenteen pienempi energiankulutus. Suurin ero eri rakennusmateriaalien välillä on Börjessonin ja Gustavssonin (2000) tutkimuksessa, jossa betonivaihtoehdon energiankulutus on noin 57 % suurempi kuin puisen. Dodoon, Gustavssonin ja Sathren (2012) laskelmissa vastaava ero on 30 % ja Lenzenin ja Treloarin (2002) pienin, noin 7 %.



Kuva 4. Puu- ja betonirakenteisen kerrostalon rakennusmateriaalien energiankulutus on esitetty positiivisena tumman sinisenä pylväänä ja bioenergian määrä negatiivisena vaaleamman sinisenä pylväänä. Lukuarvot esittävät energiaa rakennuksen lämmitettyä kerrospinta-alaa kohden yksikössä kWh/m2. Kirjaimet B&G viittaavat Börjessonin ja Gustavssonin tuloksiin (Börjesson ja Gustavsson 2000, 583), L&T Lenzenin ja Treloarin tuloksiin (Lenzen ja Treloar 2002, 251) sekä kirjaimet D, G&S Dodoon, Gustavssonin ja Sathren tuloksiin (Dodoo et al. 2012, 467-468). Rakennusvaiheessa käytettävissä olevan bioenergian määrää kuvaa pylvään keskimmäinen osa ja purkuvaiheessa pylvään alin ja vaalein osa**.**

Börjessonin ja Gustavssonin (2000) tutkimuksessa puuosien valmistukseen tarvittavan materiaalin tuotantoon tarvitaan kaksi hehtaaria metsää. Kaikki puunkorjuujäte ja puuosien valmistuksessa muodostunut puujäte sekä puuosat käyttöiän jälkeen puretusta rakennuksesta käytetään energiantuotantoon. Rakennusmateriaalien valmistukseen käytetyssä energiassa on huomioitu raaka-aineiden hankinta-, jalostus- ja kuljetusvaiheet. Purkuvaiheen kuljetuksia tai purkamiseen tarvittavaa energiaa ei ole huomioitu. Rakennettaessa betonista metsäbiomassa, joka tuotetaan kahden hehtaarin alueella, käytetään energiantuotantoon. Betonin valmistuksessa on käytetty luonnonsoraa. (Börjesson ja Gustavsson 2000, 579-780, 583, 585.)

Lenzenin ja Treloarin (2002) laskenta perustuu Börjessonin ja Gustavssonin (2000) tutkimukseen, mutta energiantarpeen laskennassa on huomioitu enemmän tuotantoketjun vaiheita. Laskennassa käytetyt rakennustuotteiden tuotantoketjutiedot sekä energiankulutuksen ja -tuotannon arvot perustuvat Australian virallisiin tilastotietoihin (Lenzen ja Treloar 2002, 250). Saadut tulokset eroavat merkittävästi toisistaan, australialaistutkimuksessa energiantarpeet ovat huomattavasti suuremmat kuin ruotsalaisessa eikä puu- ja betonirungon välillä ole yhtä merkittävää eroa. Osa tulosten eroavuuksista selittyy rakennusmateriaalien tuotantoketjujen energiaintensiteettien eroilla. Lenzenin ja Treloarin (2002) tulosten mukaan etenkin sahatavaran, mineraalivillaeristeen, kipsilevyn ja muovituotteiden energiaintensiteetissä on eroja maiden välillä. Australialainen arvo verrattuna ruotsalaiseen on sahatavaran kohdalla 5,5-kertainen, mineraalivillaeristeen 6,4-kertainen, kipsilevyn 0,4-kertainen ja muovituotteiden 0,5-kertainen. (Lenzen ja Treloar 2002, 251.)

Dodoon, Gustavssonin ja Sathren tutkimuksessa (Dodoo et al. 2012) puurakenteisiin tarvittavan puun kasvatukseen tarvittavaa maankäyttöä ei ole huomioitu samalla tavoin kuin kahdessa edellä mainitussa tapauksessa. Bioenergia saadaan sivuvirtana puunkorjuussa ja -jalostuksessa sekä rakennus- ja purkuvaiheissa muodostuneesta puujätteestä. Puunkorjuussa 70 % hakkuutähteistä, purkuvaiheessa 90 % ja muissa vaiheissa 100 % puujätteestä kerätään. Betonirakenteisen kerrostalon tapauksessa puujätettä muodostuu muiden kuin kantavien rakenteiden valmistuksen ja purkamisen yhteydessä. Laskennassa käytetty kerrostalo vastaa energialuokaltaan tutkimuksen aikaan ruotsalaisten rakentamismääräysten mukaista rakentamista. (Dodoo et al. 2012, 465.)

Pientaloja koskevien tutkimusten (Upton et al. 2007; Gong et al. 2012; Takano et al. 2015) ja rivitaloa koskevan tutkimuksen (Takano et al. 2014) perustella puurakenteisen talon rakenteiden energiankulutus on pienempi kuin muita rakennusmateriaaleja käytettäessä, tosin merkitys on myös valitulla puurakennetekniikalla. Myös näissä tutkimuksissa erot eri rakennusmateriaalien välillä vaihtelevat ja laskennan lähtökohdat ovat erilaiset. Tutkimukset on tehty eri maissa, joissa rakentamistapa ja siihen liittyvä lainsäädäntö todennäköisesti on hyvin erilainen.

Yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa (Upton et al. 2007) puurakenteisen pientalon valmistusvaiheessa kuluu 15 % vähemmän energiaa kuin betonirakenteisen ja 16 % vähemmän energiaa kuin teräsrakenteisen (Upton et al. 2007, 6). Kiinalaisen tutkimuksen (Gong et al. 2012)

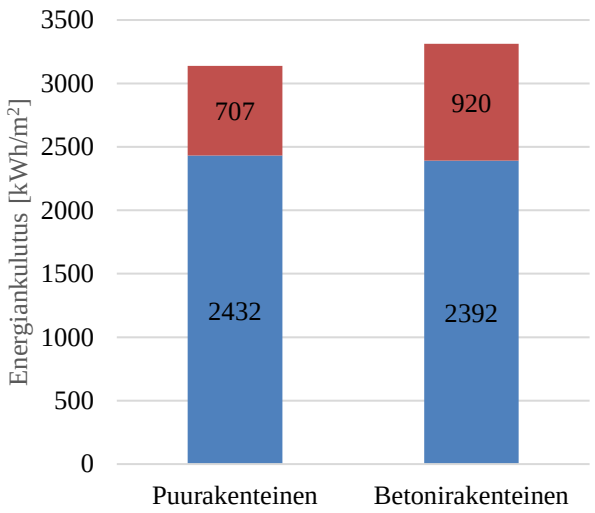
mukaan puurakenteisen pientalon valmistus- ja purkuvaiheissa kuluu 41 % vähemmän energiaa kuin teräsrakenteisen pientalon ja 35 % vähemmän kuin betonirakenteisen pientalon (Gong et al. 2012, 10). Yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa havaittiin, että ero muodostui, vaikka vain pieni osa rakenteista korvattiin puisilla, betonirakenteeseen verrattaessa 2,3 % ja teräsrakenteeseen verrattaessa 7,7 % rakennuksen painosta (Upton et al. 2007, 8).

Suomessa tehdyissä tutkimuksissa (Takano et al. 2014; Takano et al. 2015) vertailtiin rivitalon ja pientalon rakenteiden vaikutuksia rakennuksen energiankulutukseen. Vertailussa oli kaksi eri puurakennetta ja neljä muuta rakennetta. Massiiviliimapuurakenteen rakenteiden valmistusvaiheen energiankulutus oli vertailussa suurin ja kevytpuutavararakenne taas pienin (Takano et al. 2014, 530-531; Takano et al. 2015, 196-197). Pientalon elinkaaren aikainen rakennuksen primäärinen energiankulutus molemmilla puurakenteilla oli lähes sama ja muita rakennemateriaaleja pienempi, kun huomioon otettiin materiaalien kierrätys ja hyötykäyttö energiantuotannossa korvaamassa hiiltä (Takano et al. 2015, 196-197).

3.3 Rakenteiden termisen massan vaikutus käyttövaiheen energiankulutukseen

Rakennusten ympäristövaikutuksista suurin osa aiheutuu käyttövaiheessa. Tilastokeskuksen tietojen mukaan asumisen energiankulutus Suomessa on noin 60-70 TWh vuodessa, josta keskimäärin 67 % kului kaikkien asuinrakennusten tilojen lämmitykseen ja asuinkerrostalojen osuus tilojen lämmityksestä on noin 26 % (Suomenvirallinen tilasto 2016 d, 4). Rakennuksen terminen massa eli rakenteiden lämpökapasiteetti vaikuttaa lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutukseen tasaamalla sisälämpötilan vaihtelua ulkolämpötilan mukaan.

Dodoo, Gustavsson ja Sathre (2012) vertailevat tutkimuksessaanpuu- ja betonirakenteisen kerrostalon lämmitysenergiantarvetta sekä rakenteiden valmistuksessa, rakentamisessa ja purkuvaiheessa tarvittavan energian määrää (Kuva 5). Kerrostalon energialuokka on ruotsalaisten rakentamismääräysten mukainen ja rakennus sijaitsee Växjossa, Etelä-Ruotsissa. (Dodoo et al. 2012, 467-468.) Käyttöiäksi on valittu sata vuotta, jolloin rakennusmateriaalien vaikutus lämmitysenergiantarpeeseen korostuu, mikäli käyttöikä on lyhempi muissa vaiheissa käytetyn energian suhteellinen osuus on suurempi.



Kuva 5. Puu- ja betonirakenteisen kerrostalon energiankulutus lämmitettyä kerrospinta-alaa kohden (Dodoo et al. 2012, 467-468). Käytön aikainen lämmitysenergiantarve on esitetty sinisellä ja rakenteiden valmistus-, rakentamis- sekä purkuvaiheiden punaisella pylvään yläosassa.

Puurunkoinen rakennus kuluttaa elinkaarensa aikana vähemmän energiaa kuin betonirunkoinen (Kuva 5). Käyttövaiheen lämmitysenergiankulutus on noin 1,6 % pienempi betonirakenteisessa kuin puurakenteisessa kerrostalossa, mutta rakentamis- ja purkuvaiheissa betonirakenteisen kerrostalon energiankulutus on noin 30 % suurempi. Yhteensä rakentamis-, käyttö- ja purkuvaiheissa betonirakenteisen kerrostalon energiankulutus on noin 5,5 % suurempi kuin puurakenteisen kerrostalon, kun käyttöikä on sata vuotta.

Dodoon, Gustavssonin ja Sathren (2012) tutkimuksen perusteella materiaalivalinnan merkitys on suurempi kuin termisen massan tai Etelä-Ruotsista Pohjois-Ruotsiin vaihtelevien ilmasto-olosuhteiden vaikutus lämmitysenergiankulutukseen. Rakennuksen energiatehokkuus, jota voidaan parantaa muun muassa hyvillä eristeillä, tiiviydellä, tehokkaalla lämmitysjärjestelmällä ja ilmastoinnin lämmöntalteenotolla, on rakenteiden lämpökapasiteettia tärkeämpi tekijä energiankulutuksen vähentämisessä. (Dodoo et al. 2012, 467, 469.) Myös suomalaisessa tutkimuksessa (Takano et al. 2015), jossa kohteena oli pientalo, raskaat rakennusmateriaalit vähensivät käytön aikaista lämmitysenergiantarvetta, mutta vaikutus oli suhteellisen pieni, vain muutamia prosentteja (Takano et al. 2015, 197).

Eräissä tutkimuksissa (Hacker et al. 2008; Zhu et al. 2009) termisen massan pienentävä vaikutus lämmitysenergiankulutukseen on todettu huomattavasti merkittävämmäksi tekijäksi rakennuksen energiankulutuksessa. Hacker on arvioinut (Hacker et al. 2008) rakennuksen hiilidioksidipäästöjä sekä termisen massan vaikutusta energiankulutukseen ja siten päästöihin Iso-Britanniassa tyypillisen paritalon tapauksessa. Zhun Yhdysvaltoihin sijoittuvassa tutkimuksessa (Zhu et al. 2009) verrataan lämmitys- ja jäähdytysenergiankulutusta eri seinärakenteilla.

Hackerin tulosten mukaan kaikkein raskasrakenteisimman talon hiilidioksidipäästöt olivat pienimmät, kun otettiin huomioon sekä rakennusten valmistuksen, käytön aikaisen ja elinkaaren loppuvaiheen päästöt. Muut kuin käytön aikaiset päästöt olivat suuremmat raskasrakenteisimmissa tapauksissa, mutta käytön aikaiset rakenteiden lämpökapasiteetista johtuvat energian säästöt lämmityksessä ja jäähdytyksessä olivat niin merkittävät, että koko elinkaaren päästöt jäivät puurakenteista taloa pienemmiksi. (Hacker et al. 2008, 383.) Erolle tuloksissa verrattuna ruotsalaiseen tutkimukseen on monia syitä: rakenteiden valmistukseen kuluvan energian määrä on laskettu eri tavoin, eteläisen Iso-Britannian ilmasto eroaa huomattavasti pohjoismaisesta, rakenteiden lämmönläpäisyluvut eri pinnoille ovat suuremmat, lämmitykseen on käytetty maakaasua kauko-lämmön sijaan ja jäähdytykseen sähköä ja ruotsalaisessa tutkimuksessa ei ole huomioitujäähdytykseen tarvittavaa energiaa. Rakennukset ovat myös toiminnallisesti erilaiset, toinen on moniasuntoinen kerrostalo ja toinen paritalon puolikas.

Yhdysvalloissa aavikkoilmastossa toteutetussa tutkimuksessa (Zhu et al. 2009) seinien terminen massa vähensi merkittävästi rakennuksen energian kulutusta lämmityskaudella, mutta jäähdytyskaudella kulutus oli jopa hieman suurempi. Vertailtujen rakennusten seinien lämmönläpäisykertoimet erosivat toisistaan hieman betoniseinän lämmönläpäisykerroin oli 0,485 W/(m^{2}K) ja puuseinän 0,465 W/(m^{2}K). (Zhu et al. 2009, 304, 310.) Vertailun seinärakenteet ovat osa tutkimuksen mukaan energiatehokkuudeltaan hyvää rakennusta, mutta molemmat seinärakenteet läpäisevät enemmän lämpöä kuin Suomen rakentamismääräyskokoelman vertailuluvun mukainen seinä, 0,17 W/(m^{2}K) (D3 Suomenrakentamismääräyskokoelma 2012, 13), tai Ruotsin rakentamismääräysten mukainen suurinta osaa rakennuksia koskeva rakennuksen vaippa, jonka yhteenlaskettu lämmönläpäisykerroin on 0,40 W/(m^{2}K) (Boverkets byggregler 2011, 138-141).

Ruotsalaisessa tutkimuksessa (Dodoo et al. 2012) puurakenteisen kerrostalon elinkaaren aikainen energiankulutus on betonirakenteista pienempi huolimatta termisen massan vaikutuksesta lämmitysenergiantarpeeseen. Iso-Britanniassa ja Yhdysvalloissa tehdyn tutkimuksen (Hacker et al. 2008; Zhu et al. 2009) perusteella voi kuitenkin todeta, että termisen massan päästöjä pienentävä vaikutus on joissain tapauksissa niin merkittävä, että raskas betonirakennus on ympäristövaikutusten kannalta parempi vaihtoehto kuin puurakennus. Termisen massan merkitykseen vaikuttavat useat rakennustekniset seikat sekä ympäristönolosuhteet. Termisen massan on todettu vaikuttavan energiankulutukseen pienentävästi etenkin silloin, kun rakennuksessa on jäähdytysjärjestelmä, etelään suuntautuva ikkunapinta-ala on suuri ja osa jäähdytyksestä toteutetaan yhdistämällä yöaikainen ilmastoinnin tehostus ja massiivisen rakenteen lämmöntalteenottokyky (Kalema et al. 2008, 127).

4 HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖJEN VERTAILU

Hiilidioksidipäästöjä muodostuu rakenteiden valmistuksessa, kuljetuksissa, rakentamisessa ja purkamisessa tarvittavan energian tuotannossa, mutta myös esimerkiksi sementin valmistuksessa kalsinoitumisreaktiossa. Käytön aikaisia päästöjä, esimerkiksi lämmityksen energiantuotannosta, ei ole huomioitu tässä vertailussa. Vertailluissa tutkimuksissa on selvitetty joko hiilidioksidipäästöjä tai myös muita kasvihuonekaasupäästöjä yksikössä hiilidioksidiekvivaletti.

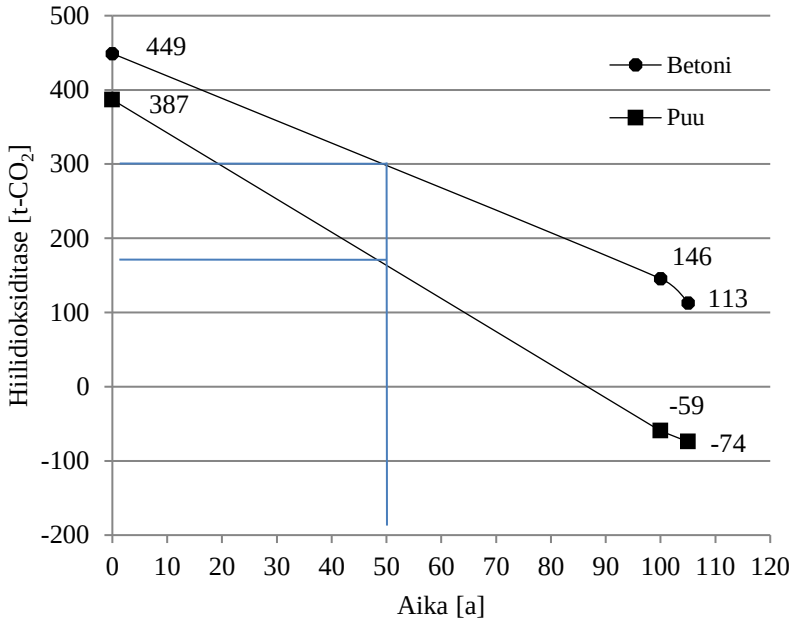
Bioenergian katsotaan olevan hiilineutraalia, koska oletetaan, että puu tuotetaan kestävän metsänhoidon mukaisesti. Kaadetun tilalle kasvava metsä sitoo ilmasta hiiltä kasvaessaan. Täysikasvuisen metsän kasvamiseen kuluu Suomessa noin sata vuotta riippuen kasvuolosuhteista, ja tänä aikana biomassan poltossa muodostunut hiilivelka kuittaantuu. Bioenergian käytön oletetaan korvaavan fossiilisia polttoaineita ja vähentävän siltä osalta energiantuotannon päästöjä.

Sementtikilon valmistuksessa kuivaprosessilla vapautuu 672 g hiilidioksidia, josta 421 g on peräisin raaka-aineesta kalsinoitumisreaktiossa ja 251 g palamisesta (Delgado Sancho et al. 2013, 44). Rakennuksesta purettu betoni sitoo itseensä hiilidioksidia eli karbonoituu, kun se on kosketuksissa ilman kanssa. Murskaaminen lisää reaktiopinta-alaa ja karbonoituminen nopeutuu. Puretun betonin käyttäminen uuden betonin valmistukseen tai esimerkiksi tien pohjan rakenteissa vähentää karbonoitumista, koska purettu betoni ei ole vapaasti kosketuksessa ilman kanssa. (Börjesson ja Gustavsson 2000, 578-579.)

Dodoon, Gustavssonin ja Sathren tutkimuksessa (Dodoo et al. 2009, 280) on laskettu puu- ja betonirakenteisen kerrostalon hiilidioksiditase rakennuksen eri vaiheissa (Kuva 6). Käyttöikä on sata vuotta, jonka alussa kerrostalo rakennetaan ja suurin osa hiilidioksidipäästöstä muodostuu energiantuotannossa, hiilivelkana metsään ja sementin kalsinaatiossa. Hakkuutähteistä 70 % ja rakenteiden valmistuksessa muodostuneesta puujätteestä 100 % kerätään ja käytetään energiantuotannossa korvaamaan hiiltä. Käyttöiän aikana hiilidioksidia sitoutuu uuden metsän kasvuun ja betonin karbonisaatiossa. Käyttöiän aikana betonirakenteisiin sitoutuu betonirakenteisen kerrostalon tapauksessa noin 23 % ja puurakenteisen kerrostalon

tapauksessa noin 14 % sementin kalsinaatiossa vapautuneesta hiilidioksidista. Käyttöiän jälkeen hiilidioksidipäästö muodostuu rakennuksen purkamisessa ja puurakenteiden poltossa. Teräksen kierrättäminen vähentää malmipohjaisen teräksen tarvetta ja siten terästuotannon hiilidioksidipäästöjä. Puretun betonin karbonisaatio sitoo hiilidioksidia ilmasta. Purettuihin ja murskattuihin betonirakenteista edelleen 26 % karbonoituu, kun murske altistetaan ilmalle neljän kuukauden ajan. (Dodoo et al. 2009, 278, 280.) Hiilidioksidin sitominen käyttöiän aikana oletetaan tapahtuvan tasaisesti ajan kuluessa. Mikäli käyttöikä on lyhempi, sen aikana metsän kasvuun sitoutuu vähemmän hiilidioksidia.

Puurakenteisen kerrostalon hiilidioksidipäästöt ovat pienemmät kuin betonirakenteisen ja sivutuotteena saadun fossiilista energiaa korvaavan bioenergian ja purettujen materiaalien kierrätyksen johdosta sadan vuoden käyttöiällä tarkasteltuna hiilitase on negatiivinen (Kuva 6). Betonirakenteisen kerrostalon päästöt ovat 113 t-CO_2, kun rakennuksen käyttöikä on sata vuotta, ja puurakenteisen kerrostalon -74 t-CO_2 eli laskennassa asetettujen rajoitusten sisällä puukerrostalon rakentamisen kokonaisvaikutus hiilidioksidin määrään ilmakehässä on hiilidioksidia sitova. Mikäli käyttöikä on lyhempi, 50 vuotta, hiilivelka metsään ei ehdi palautua, kun oletetaan, että hakkuukelpoisen metsän kasvamiseen kuluu sata vuotta. Kun kerrostalon käyttöikä on 50 vuotta, betonirakenteisen kerrostalon hiilidioksidipäästö on käyttöiän aikana 297 t-CO_2, johon lisätään käytön jälkeinen hiilidioksidipäästön vähennys -33 t-CO_2, ja kokonaispäästö on 264 t-CO_2. Puurakenteisen kerrostalon hiilidioksidipäästö on 50 vuoden käyttöiän jälkeen 164 t-CO_2, johon lisätään käytön jälkeinen päästövähennys -15 t-CO_2, ja kokonaispäästö on 149 t-CO_2.



Kuva 6. Puu- ja betonirakenteisen kerrostalon hiilidioksiditase ajan funktiona (Dodoo et al. 2009, 280). Kuvaan on merkattu viivoilla 50 vuoden ajan kohta ja sen hetkinen hiilidioksiditase.

Puurakenteen hiilidioksidipäästöt ovat pienemmät kuin muiden rakennusmateriaalien myös kahdessa kerrostaloja koskevassa tutkimuksessa (Börjesson ja Gustavsson 2000; Ruuska ja Häkkinen 2013), yhdessä rivitaloa koskevassa tutkimuksessa (Takano et al. 2014) ja kolmessa pientaloja koskevissa tutkimuksissa (Gerilla et al. 2007; Gong et al. 2012; Upton et al. 2008) saatujen tulosten mukaan. Rakennevaihtoehtojen erojen suuruus vaihtelee tutkimusten välillä, mihin vaikuttaa erilaiset laskutavat sekä erilaiset rakennustekniset ratkaisut, energiantuotantotavat ja rakennusmateriaalien raaka-aineina käytetyt varat.

Ruotsalaisen tutkimuksen (Börjesson ja Gustavsson 2000) mukaan puurakenteisen kerrostalon päästöt ovat noin puolet pienemmät kuin betonirakenteisen (Börjesson ja Gustavsson 2000, 587). Suomalaisessa tutkimuksessa (Ruuska ja Häkkinen 2013) vertailtiin toiminnallisesti samanlaisia kerrostaloja, jonka rakennusmateriaalit sekä kantavissa että muissa rakenteissa ovat joko kevyitä tai tyypillisen suomalaisen rakentamistavan mukaisia materiaaleja. Kevytrakenteisen kerrostalon kantavat rakenteet olivat pilari- ja palkkitekniikan mukaisia pääosin puisia rakenteita ja perustapauksessa kantavat rakenteet olivat tyypillisiä pääosin betonisia elementtirakenteita. Rakennusmateriaalien kasvihuonekaasupäästöt olivat perustapauksessa 955 tCO_2-ekvivalenttia, joista runkorakenteiden ja perustusten osuus oli 661

tCO_2-ekvivalenttia, ja kevyen rakenteen tapauksessa 530 tCO_2-ekvivalenttia, joista runkorakenteiden ja perustusten osuus oli 349 tCO_2-ekvivalenttia. (Ruuska ja Häkkinen 2013, 70-71.)

Suomalaisessa tutkimuksessa (Takano et al. 2014) verrattiin rivitalon rakennusmateriaalien vaikutusta hiilidioksidipäästöihin. Kevytpuutavararakenteen hiilidioksidipäästö on vertailluista pienin, teräsrakenteen toisiksi pienin ja massiiviliimapuun kolmanneksi, betoni- ja tiilirakenteilla hiilidioksidipäästöt ovat suurimmat. Hiilidioksidipäästöjen ero kevytpuu- ja betonirakenteiden välillä oli noin 80 % ja liimapuu- ja betonirakenteen noin 20 %. Puurakenteilla rakenteisiin varastoituneen hiilen määrä oli yli puolitoistakertainen päästöön verrattuna. (Takano et al. 2014, 531.)

Yhdysvaltalaisen tutkimuksen (Upton et al. 2008) mukaan puurakenteisen pientalon hiilidioksidiekvivalenttipäästöt rakennusvaiheessa ovat 50 % pienemmät kuin betonirakenteisen pientalon. Eron suuruuteen vaikutti paljon puun tuotantoon käytetyn metsän kyky sitoa hiilidioksidia, jonka ollessa suuri puurakenteen etu hiilidioksidipäästöjen suhteen pieneni. (Upton et al. 2008, 6.) Japanissa tehdyssä tutkimuksessa (Gerilla et al. 2007) betonirakenteisen pientalon hiilidioksidipäästöt ovat 23 % suuremmat kuin puurakenteisen pientalon (Gerilla et al. 2007, 2780). Kiinalaisessa tutkimuksessa (Gong et al. 2012) puurakenteisen pientalon hiilidioksidipäästöt ovat noin neljänneksen pienemmät kuin betonirakenteisen pientalon. Hiilidioksidipäästö muodostui pääosin energiantuotannossa, ja Kiinan energiantuotantorakenteen muutoksella ja energiasektorin päästöjen pienentämisellä on suuri vaikutus rakennusten elinkaarenaikaisiin päästöihin. (Gong et al. 2012, 8-10.)

Eroaviakin tuloksia on saatu esimerkiksi Yhdysvalloissa tehdyssä tutkimuksessa (Hossaini et al. 2015), jonka mukaan betoninen kerrostalo suoriutui puurakenteista kerrostaloa paremmin kestävyysvertailussa, jossa arvioitiin kolmen todellisen rakennuksen sekä ympäristö-, sosiaalisia että taloudellisia vaikutuksia elinkaaren aikana. Tulosten mukaan tärkein vaihe oli käyttövaihe, jonka osalta rakennukset eivät olleet täysin vertailukelpoisia, sillä rakennusten lämmitysenergian tarve kerrospinta-alaa kohden ei ollut sama (Hossaini et al. 2014, 1237).

Rakennusmateriaalin lisäksi rakennustekniikalla on vaikutusta muodostuneisiin hiilidioksidipäästöihin. Gustavssonin, Joelssonin ja Sathren tutkimuksessa (2009) todetaan, että myös

puukerrostalojen rakentamistekniikoiden välillä on eroja hiilidioksidipäästöjen muodostuksessa. Luvussa 2.1 esitellyistä puukerrostalorakenteista massiiviliimapuisella rankarakenteella rakennetun puukerrostalon päästöt ovat pienemmät kuin pilari- ja palkkitekniikalla tai tilaelementtitekniikalla rakennetun. Pilari- ja palkkitekniikalla päästöt taas olivat muita tekniikoita suuremmat, mikä johtuu pääasiassa siitä, että rakenteet sisältävät enemmän betonia ja terästä. Bioenergiaa taas saadaan sivuvirtana vähemmän tilaelementtitekniikkaa käytettäessä, koska puunjalostuksessa muodostuu vähemmän puujätettä. Rakennuksen energialuokan parantaminen vähentää kaikilla tekniikoilla hiilidioksidipäästöjä, vaikka rakennusmateriaalien valmistuksessa muodostuu enemmän päästöjä, pienentyneen lämmitysenergiantarpeen aiheuttama päästövähennys on suurempi. (Gustavsson et al. 2009, 205, 207.)

5 VERTAILUJEN TULOKSET JA POHDINTA

Vertailun perusteella kerrostalon rakennusmateriaalien valmistuksessa, rakentamisessa ja purkamisessa kuluu vähemmän energiaa, kun kantavat rakenteet valmistetaan pääosin puusta betonin sijaan. Rakennusmateriaalivaihtoehtojen välisten erojen suuruus vaihteli tutkimustulosten välillä ja betonirakenteisen kerrostalon rakenteiden energiankulutus oli keskimäärin 31 % suurempi kuin puurakenteisen kerrostalon (Taulukko 1).

Taulukko 1. Yhteenveto energiankulutusvertailun tutkimuksista.

Tutkimus	Energiankulutus (eron suuruus)	Merkittävimmät vaiheet ja toimenpiteet	Rajaukset	Huomiot
Börjesson ja Gustavsson 2000	Suurempi betonirakenteella (57 %)	Betoni- ja teräsrakenteiden, kipsilevyn ja eristysmateriaalin valmistus	Huomioon otettu rakenteiden valmistusvaiheen hankinta, jalostus ja kuljetukset.	Maankäyttö otettu huomioon. Sivuvirtana muodostuneen bioenergian määrä moninkertainen energiantarpeeseen verrattuna puurakenteen tapauksessa.
Lenzen ja Treloar 2002	Suurempi betonirakenteella (7 %)	Betoni- ja teräsrakenteiden, eristysmateriaalin ja puurakenteiden valmistus	Perustuu B & G 2000 tutkimukseen, mutta huomioon on otettu useampia valmistusvaiheita.	Tulosten erot alkuperäiseen tutkimukseen (B & G, 2000) verrattuna osoittavat rakennusmateriaalien tuotantoketjun energiaintensiteetin merkityksen
Dodoo et al. 2012	Suurempi betonirakenteella (5,5 %, rakentamis- ja purkuvaiheet 30 %)	Suurin osa energiankulutuksesta tapahtuu käyttövaiheen tilanlämmityksessä.	Rakentamis- ja purkuvaiheiden lisäksi huomioitu käyttövaiheen tilanlämmitys.	Käyttövaiheen tilanlämmitystarve pienempi betonirakenteen tapauksessa, mutta kokonaisenergiantarve pienempi puurakenteella.
Pientaloihin kohdistuneet tutkimukset, Upton et al. 2007, Gong et al. 2012	Keskimäärin suurempi muilla kuin puurakenteella (ero keskimäärin 27 %)	Sementin, teräksen ja kipsilevyn valmistus	Valmistus- ja purkuvaiheet otettu huomioon.	Vertailtu puu-, betoni- ja teräsrakenteita.

Puurakennetekniikan valinnalla on merkitystä, sillä eri tekniikoilla käytettävät rakennusmateriaalit ovat erilaiset ja niiden valmistamiseen kuluu eri määrä energiaa. Pilari- ja palkkitekniikkaa käytettäessä tarvitaan muita tekniikoita enemmän betoni- ja teräsrakenteita, joiden valmistaminen kuluttaa paljon energiaa. Massiiviliimapuurakenteiden valmistuksessa kuluu joidenkin tutkimusten mukaan jopa betonirakenteita enemmän energiaa. Sahatavaran valmistuksessa kuivatusprosessi kuluttaa energiaa ja massiiviliimapuun valmistuksessa lisäksi liiman valmistukseen ja liimaukseen kuluu paljon energiaa (Laurent et al. 2013, 194).

Terminen massa vaikuttaa vertailun perusteella pienentävästi rakennuksen lämmitysenergiankulutukseen. Ero lämmitysenergiantarpeessa oli vertailuun valitussa tutkimuksessa pieni, vain 1,6 %. Kohderakennuksen vaipan lämmönläpäisykerroin oli Ruotsin rakentamismääräyskokoelman mukainen 0,40 W/(m^2K). Termisen massan merkitys on suurempi, kun rakennuksen lämmitykseen ja jäähdytykseen tarvitaan paljon energiaa eli energialuokitus on huonompi.

Puurakenteiden valmistus-, rakentamis- ja purkuvaiheissa muodostuu sivutuotteena puujätettä, jonka hyödyksi käytettävissä oleva määrä perustuu erilaisiin arvioihin eri tutkimuksissa. Puubiomassa voidaan käyttää energiantuotannossa polttoaineena ja sillä voidaan korvata ja vähentää fossiilisten ja primääristen polttoaineiden kulutusta. Kun rakenteissa käytetään enemmän puuta, muodostuu sivuvirtana enemmän puujätettä. Yhdessä tutkimuksessa oli betonirakenteen kohdalla oletettu, että puurakenteisiin käyttämättä jäänyt puu käytetään energiantuotantoon, ja tällöin tuotetun bioenergian määrä oli suuri. Yleensä täysikasvuista puuta ei kuitenkaan käytetä kokonaan polttoaineena, vaan se käytetään ensisijaisesti materiaalina tai jätetään kokonaan hakkaamatta. Vertailun tutkimuksissa on oletettu, että joko kaikki eri vaiheissa muodostuneesta puujätteestä ja -biomassasta tai 70 % hakkuutähteistä, 100 % rakenneteollisuuden puujätteistä ja 90 % purkuvaiheen puujätteestä saadaan kerättyä hyötykäyttöön. Jälkimmäinen oletus on lähempänä todellisia ja teknisesti mahdollisia metsäbiomassan hyötykäyttöasteita Suomessa.

Hakkuutähteiden osalta vertailussa oletettua 70 % keräysastetta ei saavuteta Suomessa tehtävien metsähakkuiden yhteydessä. Metsäntutkimuslaitoksen Suomen metsiä koskevan selvityksen mukaan avohakkuita tehdään vuosittain 100 000-150 000 hehtaarilla ja vuonna 2012 niistä joka kolmannella kerätiin hakkuutähteitä ja joka kymmenennellä kantoja (Asikainen et al. (toim.) 2012, 83). Kaikkia hakkuutähteitä ei pystytä keräämään hakkuualalta ja

se ei ole tavoiteltavaakaan. Metsäntutkimuslaitoksen koepalstoilla hakkuutähteistä saatiin kerättyä 72 %, kun tavoitteena oli kerätä 100 %, ja kun tavoitteena oli kerätä 70 %, kerättyä saatiin 40 %. Hakkuutähteiden keräämisen jälkeen metsään jäävät osat, kuten pienet oksat ja neulaset, jotka ovat hankalimmin kerättäviä, sisältävät myös eniten ravinteita, kuten typpeä. (Asikainen et al. (toim.) 2012, 55.) Ravinteiden etenkin typen väheneminen metsässä voi johtaa metsän kasvun heikkenemiseen (Asikainen et al. (toim.) 2012, 57-58).

Metsäbioenergian hyötykäyttöä on tavoite lisätä myös hakkuutähteiden osalta. Vuoteen 2020 mennessä kerättävä määrä on tarkoitus kaksinkertaistaa, mikä tarkoittaisi, että hakkuutähteitä ja kantoja kerättäisiin 60–80 %:lla avohakkuista (Asikainen et al. (toim.) 2012, 83). Metsäbioenergian halvimman osuuden eli latvusmassan ja kantojen korjuumahdollisuudet ovat suoraan sidoksissa päätehakkuiden määrään. Päätehakkuiden on ennustettu vähenevän tukkipuun kysynnän laskiessa, mutta kotimaista tukkipuuta käyttävän saha- ja vaneriteollisuuden kasvu mahdollistaisi myös enemmän energiapuun keräämisen. (Asikainen et al. (toim.) 2012, 196.) Puuraaka-aineen käyttö bioenergiantuotantoon lisää taloudellista merkitystään metsäteollisuudessa, kun paperi- ja kartonkiteollisuuden jalostusarvo laskee sekä absoluuttisesti että suhteellisesti, kun taas energian hinnan arvioidaan nousevan (Asikainen et al. (toim.) 2012, 20).

Osa bioenergiasta saadaan myös rakennusjätteistä, joita muodostuu rakentamisvaiheessa, korjausrakentamisessa ja purettaessa rakennus. Vertailluissa tutkimuksissa rakennusjätettä käytettiin pääasiassa energiantuotantoon, mikä vastaa nykyistä suomalaista käytäntöä. Ympäristöministeriön selvityksen mukaan puujae on rakennusjätteen suurin jätejae, jonka osuus on 41 %, kun maa-aineksia ei huomioida (Peuranen ja Hakaste (toim.) 2014, 11). Puurakennusjäte hyödynnetään pääasiassa energiana ja hyödyntämisaste Suomessa on noin 86 % (Ruuska et al. 2013, 18-19). Tulevaisuudessa energiahyödyntämisen osuutta on tarkoitus vähentää ja panostaa jätteen materiaalihyödyntämiseen eli tavoitteena myös puujätteen osalta on kierrättää jäte pääosin materiaalina, esimerkiksi rakennusmateriaaleina, mikä edellyttää, että purettu puu on hyväkuntoista. Rakennusjätteiden kierrätysasteen ilman energiahyödyntämistä on arvioitu olevan Suomessa 26 %. (Peuranen ja Hakaste (toim.) 2014, 11-12.)

Hiilidioksidipäästöjen vertailun perusteella puurakenteinen kerrostalo tuottaa vähemmän hiilidioksidipäästöjä kuin betonirakenteinen (Taulukko 2). Suurimmat hiilidioksidipäästöihin vaikuttavat toiminnot olivat energiantuotanto, biomassan poltto ja sementin kalsinaatio.

Muutoksilla etenkin näihin merkittävimpiin hiilidioksidipäästöjä aiheuttaviin toimintoihin voidaan pienentää rakennusten hiilidioksidipäästöjä. Mikäli energiantuotantoon käytetään uusiutuvia tai hiilidioksidipäästöjen osalta neutraaleja energiantuotantotapoja, molempien rakennevaihtoehtojen hiilidioksidipäästö pienenee. Mikäli pienempi osa biomassasta käytetään energiantuotantoon, biomassan sisältämä hiili vapautuu hitaammin ilmakehään luonnollisen hajoamisen myötä.

Taulukko 2. Yhteenveto hiilidioksidipäästöjen vertailun tutkimuksista.

	Hiilidioksidi- tai hiilidioksidiekvivalenttipäästö (eron suuruus)	Merkittävimmät vaiheet ja toimenpiteet	Rajaukset	Huomiot
Dodoo et al. 2009	Suurempi betonirakenteella (rakennusvaiheessa 16 %, 50 a käyttöikä 77 %, 100a käyttöikä: puurakenne hiilen nettositoja)	Energiantuotanto, hiilen poistuma metsästä, sementin kalsinaatio	Rakenteiden valmistus- ja purkuvaiheet huomioitu, käyttövaiheessa mukana metsän ja betonin karbonaation hiilensitominen.	Sivuvirtana tuotetun bioenergian määrän oletettu olevan korkea
Muut kerros- ja rivitaloihin kohdistuneet tutkimukset[1]	Suurempi betonirakenteella (ero keskimäärin 72 %)	Energiantuotanto, hiilen sitoutuminen rakenteisiin, kivihiilen korvaaminen bioenergialla; betonirakenteiden ja kipsilevyn valmistus; ulkoseinien, perustusten ja katon valmistus	Rakenteiden valmistus- ja purkuvaiheet huomioitu	Rivitalossa vertailtu myös eri puurakennustekniikoita, joista kevytpuutavaravaihtoehdon päästöt pienimmät
Pientaloihin kohdistuneet tutkimukset[2]	Suurempi betonirakenteella (ero keskimäärin 45 %)	Energiantuotanto, hiilen poistuma metsästä	Rakenteiden valmistus- ja purkuvaiheet huomioitu	Energiateollisuuden päästöintensiivisyydellä ja puuraakaaineen hankintaan käytetyn metsän hiilensitomiskyvyllä suuri merkitys

[1] Ruuska ja Häkkinen 2013, Börjesson ja Gustavsson 2000, Takano et al. 2014

[2] Upton et al. 2008, Gerilla et al. 2007, Gong et al. 2012

Hiilidioksidipäästöjen vertailussa bioenergia oli hiilineutraalia, koska oletuksina käytettiin kestävää metsän hoitotapaa ja valittu tarkasteluaika oli tarpeeksi pitkä, jotta täysikasvuinen metsä sitoo takaisin kasvuaikanansa hakkuussa poistuneen hiilen. Merkitystä on siis, millaisilla menetelmillä puuraaka-ainetta tuotetaan. Kun rakennuksen käyttöikä on pitkä, rakennuksia tarvitsee rakentaa vähemmän ja rakentamisesta aiheutuneet päästöt ovat pienemmät.

Tutkimuksissa rakennusten käyttöikä oli oletettu pitkäksi ja kantavien rakenteiden materiaalivalinnalla ei oletettu olevan vaikutusta käyttöikään. Materiaalivalinnalla voisi olla eroa rakennuksen käyttöikään, jos esimerkiksi eri materiaalit kestävät käyttöä ja rakenteissa vallitsevia olosuhteita eri tavalla tai rakennuksen käyttötarkoituksen muuttuessa tilojen muunneltavuudessa olisi eroja. Jos rakennuksen käyttöikä on lyhempi, rakennusvaiheen ja purkuvaiheen merkitys korostuu suhteessa käyttöiän aikaisiin ympäristövaikutuksiin, ja materiaalivaihtoehto, jonka valmistamisen ympäristövaikutukset ovat pienemmät on ympäristövaikutusten kannalta parempi vaihtoehto.

Rakennuksen suunnittelussa ja rakentamisessa rakennustekniikkaa ei voi valita pelkästään energiankulutuksen ja hiiidioksidipäästöjen perusteella, vaan rakentamiskustannukset ovat merkittävä tekijä. Betonin käyttö kerrostalorakentamisessa on vallitseva tekniikka, ja rakentamiskustannuksia pienentävät pitkä kokemus tekniikasta ja laaja tuotanto johtaa suuruuden ekonomiaan. Puukerrostalorakentamisen yleistyessä ja hankkeiden määrän kasvaessa samoja etuja saavutetaan myös puurakentamisen alalla ajan myötä. Vaikka vertailluissa tutkimuksissa ei otettu kantaa materiaalivalinnan vaikutukseen rakennuksen kustannuksiin, pienempi energiankulutus rakennustarvikkeiden valmistuksessa vaikuttaa myös energiahankintakustannuksiin.

6 YHTEENVETO

Puukerrostalorakentaminen on Suomessa melko uusi ala, joka on tullut vaihtoehdoksi betonikerrostalorakentamiselle viimeisen parin kymmenen vuoden aikana ja viime vuosien aikana se on lisännyt merkitystään kerrostalorakentamisessa. Puukerrostalorakentamista on edistetty muuttamalla rakentamismääräyksiä siten, että puun käyttäminen korkeiden rakennusten kantavissa rakenteissa on palomääräysten puolesta mahdollista ja perustuu rakenteiden luokkiin ja lukuarvoihin. Valtakunnallisissa edistämishankkeissa puukerrostalorakentaminen on nähty uutena metsäteollisuuden toimialana, jolla on mahdollisuuksia kasvaa. Ammattitaitoa puukerrostalorakentamisen alalla on lisätty muun muassa aiheeseen liittyvällä tutkimuksella ja pilottihankkeilla.

Puun käytön lisäämisellä rakentamisessa tavoitellaan rakennusten pienempiä ympäristövaikutuksia ja pienempää energiankulutusta. Suomi on sitoutunut kansainvälisiin sopimuksiin, joiden mukaan yhteiskunnan eri osa-alueilla tehtävillä toimenpiteillä vähennetään tuotettuja kasvihuonekaasupäästöjä, pienennetään energiankulutusta ja siirrytään kestävämpiin ratkaisuihin energiantuotannossa ja materiaalien käytössä. Rakennuksissa kuluva energia on merkittävä osa yhteiskunnan kokonaisenergiankulutusta, ja esimerkiksi rakennusten lämmitykseen kuluvan energian määrään uusissa rakennuksissa on vaikutettu energiantehokkuuteen liittyvillä rakentamismääräyksillä. Tämän kandidaatintyön tarkoitus oli selvittää kantavien rakenteiden materiaalivalinnan vaikutuksia asuinkerrostalorakennuksen elinkaaren aikaisiin hiilidioksidipäästöihin ja energiankulutukseen.

Puu- ja betonirakenteisia kerrostaloja verrattiin rakennuksen valmistus- ja purkuvaiheiden energiankulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen sekä käyttövaiheen lämmitysenergiantarpeen osalta. Puurakenteisen kerrostalon valmistus- ja purkuvaiheiden energiankulutus ja hiilidioksidipäästöt olivat pienemmät kuin betonirakenteisen kerrostalon. Käyttövaiheessa betonirakenteen terminen massa johti pienempään lämmitysenergiantarpeeseen kuin puurakenteisella kerrostalolla, mutta lämmitysenergian eron suuruus oli pienempi kuin rakentamis- ja purkuvaiheiden ero. Merkitystä oli esimerkiksi rakenteiden raaka-aineina käytettyjen materiaalien alkuperällä, rakenteiden valmistusteollisuuden energiaintensiivisyydellä ja rakennuksen energiatehokkuudella. Energiakulutuksen ja päästöjen eron suuruus vaihteli tutkimusten välillä paljon, mikä johtuu rakennusmateriaalivalinnasta aiheutuvien erojen lisäksi

tutkimusten erilaisista lähtökohdista, laskentatavoista ja tehdyistä rajauksista. Tästä johtuen tutkimustulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia ja niitä vertailtaessa johtopäätökset ovat luonteeltaan suuntaa-antavia.

Rakennusten käyttöiän aikaisen energiatehokkuuden parantuessa rakennusten energiankulutusta ja hiilidioksidipäästöjä voidaan pienentää valitsemalla kantaviin rakenteisiin puumateriaaleja betoni- ja teräsrakenteiden sijaan. Kantavien rakenteiden lisäksi puumateriaaleja voidaan käyttää myös muissa rakenteissa. Jotta puurakenteisten rakennusten käyttöikä olisi mahdollisimman, rakennukset on rakennettava huolella ja rakenteet suojattava esimerkiksi tulipalolta ja kosteudelta. Puurakentamisen oltava myös kustannustehokasta, jotta sen merkitys kerrostalorakentamisessa kasvaisi.

LÄHTEET

Anderson J.-O., Westerlund L. 2013. Improved energy efficiency in sawmill drying system. *Applied Energy*, vol. 113, pp. 891-901. ISSN: 0306-2619.

Asikainen A. et al. (toim.). 2012. Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät. Metlan työraportteja 240. 211. ISBN 978-951-40-2378-1. Saatavilla: http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp240.pdf.

Betoniteollisuus ry a. Betoni/Tietoa betonista/Perustietopaketti/Betoni rakennusmateriaalina/Betonin valmistus [verkkolähde]. [viitattu 19.1.2017]. Saatavilla: http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/betonin-valmistus/.

Betoniteollisuus ry b. Betoni/Tietoa betonista/Perustietopaketti/Ympäristönäkökohdat/Kuljetukset [verkkolähde]. [viitattu 10.2.2017]. Saatavilla: http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ekologisuus/kuljetukset/.

Biotalous. 2014. Kestävää kasvua biotaloudesta - Suomen biotalousstrategia [verkkojulkaisu]. 30. [viitattu 25.1.2017]. Saatavilla: http://www.biotalous.fi/wp-content/uploads/2015/01/Suomen_biotalousstrategia_2014.pdf.

Boverkets byggregler. 2011. Boverkets byggregler – föreskrifter och allmänna råd, BBR - BFS 2011:6 med ändringar till och med BFS 2016:13 [verkkojulkaisu]. 157. [viitattu 8.2.2017]. Saatavilla: http://www.boverket.se/contentassets/a9a584aa0e564c8998d079d752f6b76d/konsoliderad_bbr_2011-6.pdf.

Börjesson P., Gustavsson L. 2000. Greenhouse gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspective. *Energy Policy*, vol. 28, pp. 575-588. ISSN: 0301-4215.

D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma. 2012. Rakennusten energiatehokkuus – Määräykset ja ohjeet 2012. Ympäristöministeriö. Rakennetun ympäristön osasto. Saatavilla:

http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Energiatehokkuus.

Delgado Sancho L. et al. 2013. Best available techniques (BAT) reference document for the production of cement, lime and magnesium oxide [verkkodokumentti]. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 480. [viitattu 3.2.2017]. ISBN 978-92-79-32944-9. Saatavilla: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/CLM_Published_def.pdf.

Dodoo A., Gustavsson L., Sathre R. 2009. Carbon implications of end-of-life management of building materials. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 53, pp. 276-286. ISSN: 0921-3449.

Dodoo A., Gustavsson L., Sathre R. 2012. Effect of thermal mass on life cycle primary energy balances of a concrete- and a wood-frame building. *Applied Energy*, vol. 92, pp. 462-472. ISSN: 0306-2619.

E1 Suomen rakentamismääräyskokoelma. 2011. Rakennusten paloturvallisuus - Määräykset ja ohjeet 2011. Ympäristöministeriö. Rakennetun ympäristön osasto. Saatavilla: http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Paloturvallisuus.

Frantz Å. 2008. Limnologen – Inblick i svenskträbyggande [verkkodokumentti]. Växjouniversitet, Institutionen för teknikoch design. [viitattu 25.1.2017]. Diplomityö. Saatavilla: http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:205942/FULLTEXT01.pdf.

Gerilla G.P., Teknomo K., Hokao K. 2007. An environmental assessment of wood and steel reinforced concrete housing construction. *Building and Environment*, vol. 42, pp. 2778-2784. ISSN: 0360-1323.

Gong X. et al. 2012. Life cycle energy consumption and carbon dioxide emission of residential building designs in Beijing - A comparative study. *Journal of Industrial Ecology*, vol. 16, pp. 576-587. ISSN: 1530-9290.

Gustavsson L., Joelsson A., Sathre R. 2009. Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building. *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 230-242. ISSN: 0378-7788.

Hacker J. N. et al. 2008. Embodied and operational carbon dioxide emissions from housing: A case study on the effects of thermal mass and climate change. *Energy and Buildings*, vol. 40, pp. 375–384. ISSN: 0378-7788.

Hossaini N. et al. 2015. AHP based life cycle sustainability assessment (LCSA) framework: a case study of six storey wood frame and concrete frame buildings in Vancouver. *Journal of Environmental Planning and Management*, vol. 58, pp. 1217-1241. ISSN: 1360-0559.

Huttunen R. (toim.). 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030 [verkkojulkaisu]. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö. 119. [viitattu 20.2.2017]. ISBN 978-952-327-190-6. Saatavilla: http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-190-6.

Jantunen J. et al. 2010. Puurakentamisen asema rakentamismääräyksissä - Työryhmän loppuraportti [verkkojulkaisu]. Helsinki: Ympäristöministeriö. 30. [viitattu 25.1.2017] Saatavilla: http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/tiedotteet/palomaaraykset-uudistuvat-puutuoteala-investoi-uusiin-puurakentamisen-ratkaisuihin-ja-osaamiseen/puu-ja-rakentamismaaraykset-tyoryhmamuistio-29-11-2010-2.pdf.

Julin J. et al. 2010. Puurakentamisen edistäminen kansainvälisesti ilmastopoliittisin perustein - Työryhmän raportti [verkkojulkaisu]. Ulkoasiainministeriö. 58. [viitattu 25.1.2017]. Saatavilla: http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/tiedotteet/suomen-kaynnistettava-vaikuttamisohjelma-puurakentamisen-edistamiseksi/puurakentamisen-edistaminen-ilmastopoliittisin-perustein-raportti.pdf.

Kryssi E. 2013. Puukerrostalo [verkkodokumentti]. Tampereen teknillinen yliopisto. [viitattu 25.1.2017]. Diplomityö. Saatavilla: https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21966/Kryssi.pdf?sequence=.

Lahtinen R., Nurmi P. A., Vuori S. 2010. Suomen mineraalistrategia. Työ- ja elinkeinoministeriö. 20. [viitattu 25.1.2017]. Saatavilla: http://projects.gtk.fi/export/sites/projects/mineraalistrategia/documents/SuomenMineraalistrategia_2.pdf.

Lenzen M., Treloar G. 2002. Embodied energy in buildings: wood versus concrete – reply to Börjesson and Gustavsson. *Energy Policy*, vol. 30, pp. 249-255. ISSN: 0301-4215.

Loukasmäki P. 2016. Puutuoteteollisuus. Toimialaraportti 6/2016. [verkkojulkaisu]. Työ- ja elinkeinoministeriö. TEM:n ja ELY-keskusten julkaisu. 52. [viitattu 25.1.2017]. ISBN 978-952-327-156-2. Saatavilla: http://www.temtoimialapalvelu.fi/files/2731/Puutuoteteollisuus_net_2.pdf.

Metsäntutkimuslaitos. 2014. Metsätilastollinen vuosikirja 2014 - 5 Hakkuut ja puun kuljetus [verkkojulkaisu]. Vantaa: Suomen virallinen tilasto - Maa-, metsä- ja kalatalous 2014. 426. [viitattu 10.2.2017]. ISBN 978 951 40 2505 1. Saatavilla: http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/vsk/2014/vsk14_05.pdf.

Peuranen E., Hakaste H (toim.). 2014. Rakentamisen materiaalitehokkuuden edistämisohjelma. Ympäristöministeriön raportteja 17/2014. Helsinki: Ympäristöministeriö. 31. ISBN 978-952-11-4342-7. Saatavilla: http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10138/135172/YMra_17_%202014.pdf?sequence=1.

Puuinfo. 2016. Suomalaiset puukerrostalot 1995-2016. [viitattu 25.1.2017]. Saatavilla: http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/LUKUJA%20JA%20LASKELMIA%2030122016.pdf.

Puuinfo. 2017. Valmistuneet puukerrostalot [verkkojulkaisu]. [viitattu 12.1.2017]. Saatavilla: http://www.puuinfo.fi/articles/valmistuneet-puukerrostalot.

Ruuska A., Häkkinen T. Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset – Taustaraportti [verkkojulkaisu]. Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT. [viitattu 10.3.2017]. Saatavilla: http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2013/YM_Taustaraportti.pdf.

Ruuska A. et al. 2013. Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset [verkkojulkaisu]. Ympäristöministeriön raportteja 8/2013. Helsinki: Ympäristöministeriö. 39. ISBN 978-952-11-4154-6. [viitattu 10.3.2017]. Saatavilla: http://www.ym.fi/download/noname/%7B1FAF46B2-2649-41ED-B3AA-5EA789C9512F%7D/37571.

Suomen virallinen tilasto. 2016 a. Tieliikenteen tavarankuljetukset 2015 [verkkojulkaisu]. Helsinki: Tilastokeskus. Liikenne ja matkailu. ISSN=2323-3273. [viitattu: 23.1.2017]. Saatavilla: https://www.stat.fi/til/kttav/2015/kttav_2015_2016-05-18_fi.pdf.

Suomen virallinen tilasto. 2016 b. Asuminen/Rakennukset ja kesämökit/Rakennukset (lkm, m2) käyttötarkoituksen ja rakennusvuoden mukaan 31.12.2015. Tilastokeskuksen PX-Web-verkkotilastokannat. [viitattu 17.1.2017]. Saatavilla: http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/.

Suomen virallinen tilasto. 2016 c. Rakennukset ja kesämökit 2015 [verkkojulkaisu]. Helsinki: Tilastokeskus. ISSN=1798-677X. [viitattu: 12.1.2017]. Saatavilla: http://www.stat.fi/til/rakke/2015/rakke_2015_2016-05-26_fi.pdf.

Suomen virallinen tilasto. 2016 d. Asumisen energiankulutus 2015 [verkkojulkaisu]. Helsinki. Tilastokeskus. ISSN=2323-3273. [viitattu: 23.1.2017]. Saatavilla: http://www.stat.fi/til/asen/2015/asen_2015_2016-11-18_tie_001_fi.html.

Takano A., Hughes M., Winter S. 2014. A multidisciplinary approach to sustainable building material selection: A case study in a Finnish context. *Building and Environment*, vol. 82, pp. 526-535. ISSN: 0360-1323.

Takano A. et al. 2015. The effect of material selection on life cycle energy balance: A case study on a hypothetical building model in Finland. *Building and Environment*, vol. 89, pp. 192-202. ISSN: 0360-1323.

Tolppanen J. et al. 2013. Suomalainen puukerrostalo - Rakenteet, suunnittelu ja rakentaminen. Helsinki: Opetushallitus, Puuinfo. 194. ISBN 978-952-13-5541-7.

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2015. Metsästä kohti biotalouden edelläkävijyyttä - Metsäalan strategisen ohjelman (MSO) loppuraportti. Työ- ja elinkeinoministeriö, Metsäalan strateginen ohjelma. TEM oppaat ja muut julkaisut 16/2015. ISBN 978-952-227-992-7. 22. Saatavilla: http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-227-991-0.

Upton B. et al. 2008. The greenhouse gas and energy impacts of using wood instead of alternatives in residential construction in the United States. *Biomass and Bioenergy*, vol. 32, pp. 1-10. ISSN: 0961-9534.

Zhu L. et al. 2009. Detailed energy saving performance analyses on thermal mass walls demonstrated in a zero energy house. *Energy and Buildings*, vol. 41, pp. 303-310. ISSN: 0378-7788.

Ympäristöministeriö. 2011. Muistio - Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta. Saatavilla: http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Paloturvallisuus.