

HAMPPU JA MAISSI PELTOBIOENERGIAKASVEINA SUOMESSA: SATO JA LAATU

Essi Tahvola
Maisterintutkielma
Helsingin yliopisto
Maataloustieteiden laitos
Kasvinviljelytiede
2016

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos — Institution — Department Maataloustieteiden laitos	
Tekijä — Författare — Author Essi Tahvola			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Hamppu ja maissi peltobioenergiakasveina Suomessa: Sato ja laatu			
Oppiaine — Läroämne — Subject Kasvintuotantotieteet/Kasvinviljelytiede			
Työn laji — Arbetets art — Level Maisterintutkielma		Aika — Datum — Month and year Maaliskuu 2016	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 66 s.
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>Peltobioenergia on uusiutuvan energian muoto, jossa pelloilla kasvatettujen viljelykasvien kuiva-aine käytetään erilaisten energiamuotojen, kuten biokaasun tai etanolin tuotantoprosessien raaka-aineeksi. Peltobioenergian avulla voidaan lisätä uusiutuvien energiamuotojen käyttöastetta, jonka EU:n asetuksen mukaisesti tulee olla 20 % kokonaisenergiankulutuksesta vuoteen 2020 mennessä. Hamppu (<i>Cannabis sativa</i> L.) ja maissi (<i>Zea mays</i> L.) ovat perinteisiä viljelykasveja, jotka muodostavat runsaasti kuiva-ainetta ja voivat monipuolistaa viljelykasvivalikoimaamme. Tutkimuksen tarkoituksena oli analysoida hampun ja maissin soveltuvuutta peltobioenergiakasveiksi Suomessa sekä lajikkeiden välisiä eroja bioenergiantuotannon näkökulmasta.</p> <p>Kenttäkokeet perustettiin Helsingin yliopiston opetus- ja tutkimustilalla vuosina 2007 ja 2008. Tutkitut ominaisuudet olivat: satoisuus, ravinteidenotto, kuiva-aineen alkuaine-, tuhka-, energia- ja liukoisten sokereiden pitoisuus sekä C/N- ja C/P-suhde. Hamppulajikkeet olivat öljyhamppu Finola ja kuituhamput Chamaeleon ja USO 31. Maissilajikkeet olivat Gavot, Campesino, Ronaldino, KXA7211 ja KXA7251. Hamppu lannoitettiin molempina vuosina 60 N kg/ha ja maissi 120 N kg/ha vuonna 2007 ja 210 N kg/ha vuonna 2008.</p> <p>Hamppulajikkeista Chamaeleon tuotti yli 20 % runsaamman kuiva-ainesadon (18 000 kg/ha) seuraavaksi satoisimpaan USO 31:n verrattuna. Maissilajikkeista Campesino, Gavot ja KXA7251 tuottivat runsaimman kuiva-ainesadon (15 500–18 000 kg/ha). Maissin kuiva-aineessa oli runsaasti liukoisia sokereita (177–215 mg/kg KA). Hamppu- ja maissilajikkeiden tuhkapitoisuus oli suuri.</p> <p>Hamppu ja maissi eivät sovellu laadullisilta ominaisuuksiltaan hyvin kaikkien bioenergiantuotantomuotojen raaka-aineeksi. Jatkojalostamattoman kuiva-aineen korkea alkuainepitoisuus häiritsee polttamista ja epätasapainoinen C/N- ja C/P-suhde biokaasun tuotantoa. Maissi on kuitenkin erinomainen vaihtoehto etanolintuotannon raaka-aineeksi kuiva-aineen korkean liukoisten sokerien pitoisuuden ansiosta.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords alkuainepitoisuus, C/N-suhde, C/P-suhde, ravinteidenotto, liukoiset sokerit			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Maataloustieteiden laitos ja Viikin kampuskirjasto			
Ohjaaja — Övriga uppgifter — Further information Arja Santanen, Pirjo Mäkelä			

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos — Institution — Department Department of Agricultural Sciences	
Tekijä — Författare — Author Essi Tahvola			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Hemp and maize as bioenergy crops in Finland: Biomass yield and quality			
Oppiaine — Läroämne — Subject Crop science			
Työn laji — Arbetets art — Level Master's thesis		Aika — Datum — Month and year March 2016	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 66 p.
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>Field bioenergy is a form of renewable energy, where plant biomass is used as feedstock in different energy production systems. Field based bioenergy will help to increase renewable energy utilization, which should be 20% of total energy consumption in year 2020 according to the EU regulations. Hemp (<i>Cannabis sativa</i> L.) and maize (<i>Zea mays</i> L.) are traditional crops with significant dry matter yield potential and they can be used as break crops in conventional crop rotations. The purpose of this study was to analyze the suitability of hemp and maize as feedstock crops in Finland, as well as the varietal differences based on feedstock quality and yield.</p> <p>Field experiment were conducted at the Viikki Experimental farm, University of Helsinki, Finland in 2007 and 2008. Studied traits were dry matter yield, nutrient uptake and feedstock chemical composition, ash, energy and soluble sugar content as well as C/N- and C/P-ratios. Experiments included three hemp cultivars, oilhemp Finola and fibre-hemp Chamaeleon and USO 31 and five maize cultivars: Gavot, Campesino, Ronaldino, KXA7211 and KXA7251. Fertilizer rates were 60 N kg/ha for hemp and 120 N kg/ha for maize in 2007 and 210 N kg/ha in 2008.</p> <p>Chamaeleon produced the highest dry matter yield (18 000 DM kg/ha), and the difference to the next one, USO 31 was more than 20 %. Campesino, Gavot and KXA7251 produced the highest dry matter yield (15 500-18 000 DM kg/ha) of maize cultivars studied. Maize dry matter was rich in soluble sugars (177-215 mg/kg DM). Hemp and maize biomass was high in content of different elements and ash.</p> <p>The results indicated that hemp and maize can produce high dry matter yield. However the feedstock quality traits are not ideal for energy. High content of different elements in unprocessed dry matter interferes with the burning and imbalanced C/N- and C/P-ratio biogas production. Based on the results maize can be an excellent option as bioethanol feedstock due to high content of soluble sugars in the dry matter.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords element content, C/N-ratio, C/P-ratio, nutrient uptake, soluble sugars			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Department of Agricultural Sciences and Viikki Campus Library			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Arja Santanen, Pirjo Mäkelä			

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	KASVIEN KUIVA-AINE ENERGiantuotannon RAAKA- AINEENA	8
2.1	Kuiva-aineen muodostuminen.....	9
2.2	Energiantuotantoon soveltuvan kuiva-aineen laatuvaatimukset.....	10
2.2.1	Poltto.....	10
2.2.2	Etanolin tuotanto	12
2.2.3	Biokaasun tuotanto	13
3	HAMPPU JA MAISSI PELTOBIOENERGIAKASVEINA	15
3.1	Hamppu	15
3.1.1	Hamppu	15
3.1.2	Hampun elinkaari	17
3.1.3	Viljely.....	19
3.2	Maissi.....	20
3.2.1	Maissi.....	20
3.2.2	Maissin elinkaari	22
3.2.3	Viljely.....	24
3.3	Hampun ja maissin kuiva-aine energiantuotannossa	25
3.3.1	Hampun ja maissin kuiva-aineen muodostuminen ja siihen vaikuttavat tekijät: Säteilyn- ja vedenkäytön tehokkuus	25
3.3.2	Satoisuus ja satopotentiaalit bioenergiantuotannossa	26
3.3.3	Kuiva-aineen laadullinen koostumus ja sen vaikutus sadon käytettävyyteen bioenergiantuotannossa	28
4	TUTKIMUKSEN TARKOITUS	31
5	AINEISTO JA MENETELMÄT	32
5.1	Kokeen toteutus	32
5.1.1	Koejärjestely	32
5.1.2	Kasvimateriaali.....	32

5.2	Näytteiden keräys ja käsittely.....	33
5.2.1	Kemialliset analyysit ja käytetyt laskukaavat.....	33
5.2.2	Liukoisten sokerien pitoisuus	34
5.3	Säätila kasvukausien 2007 ja 2008 aikana	35
5.4	Tilastolliset analyysit	36
6	TULOKSET	37
6.1	Hamppulajikkeiden ominaisuudet.....	37
6.1.1	N-, P-, K-otto	37
6.1.2	Satoisuus	38
6.1.3	Kuiva-aineen laadulliset ominaisuudet.....	40
6.2	Maissilajikkeiden ominaisuudet.....	43
6.2.1	N-, P-, K-otto	43
6.2.2	Satoisuus	44
6.2.3	Kuiva-aineen laadulliset ominaisuudet.....	46
7	TULOSTEN TARKASTELU.....	49
7.1	Hampun kuiva-aineessa on potentiaalia energiantuotannon raaka-aineeksi	49
7.2	Maissilajikkeet olivat satoisia ja bioenergialadultaan hyviä	51
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	54
9	KIITOKSET	55
10	LÄHTEET.....	56

1 JOHDANTO

Energiantuotantoa on poliittisin keinoin ohjattu Euroopan Unionissa (EU) jatkuvasti kohti kestäväää ja ilmastoystävällistä suuntaa. Euroopan parlamentin päätöksen mukaisesti vuoden 2020 mennessä 20 % jäsenvaltioiden käyttämästä energiasta on oltava peräisin uusiutuvista lähteistä (European Parliament 2009). Peltobioenergiakasveista tuotetun energian odotetaan muodostavan tulevaisuudessa suurimman osan EU:n alueella käytettävästä uusiutuvasta energiasta (Bentsen & Felby 2012). Viljelijöille peltobioenergia luo uusia mahdollisuuksia vastata maataloudelle asetettuihin ympäristörajoituksiin ja uutena tuotantosuuntana ja mahdollisuutena kehittää maaseutua ja luoda uusia työpaikkoja (Hazell & Pachauri 2006). Peltobioenergia on keskusteluissa noussut toisaalta kiistanalaiseksi uusiutuvan energian muodoksi. Ruoantuotantoon soveltuvan pellon käyttäminen energiantuotantoon heikentää ruoan saatavuutta kehittyvissä maissa, joissa nälänhätä on edelleen jokapäiväinen ongelma. Ruoantuotantoon soveltuvan pinta-alan siirtäminen muuhun käyttöön uhkaa ruokaturvallisuuden lisäksi nostaa ruoan hintaa ja tätä kautta heikentää edelleen kaikkein köyhimpien asemaa (Hazell & Pachauri 2006).

Tällä hetkellä energian tuotannossa hyödynnetään hyvin erilaisista lähteistä peräisin olevia kasviperäisiä raaka-aineita, kuten maa- ja metsätalouden prosessointijätteitä ja sivutuotteita sekä bioenergian raaka-aineeksi viljeltyjä kasvustoja (Bentsen & Felby 2012). Peltobioenergiaksi viljeltävien kasvien tärkein ominaisuus on kyky muodostaa mahdollisimman paljon kuiva-ainetta pinta-alaa kohden (Davis ym. 2013, Prade ym. 2011, Godin ym. 2013a ja b). Peltobioenergiakasvien viljelystä ja energiaksi muuntamisesta aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen on oltava vähäisemmät kuin fossiilisten polttoaineiden käytöstä, jotta niiden viljelystä olisi hyötyä ympäristön kannalta. Runsaan satoisuuden lisäksi peltobioenergiaksi viljeltävien kasvien tavoiteltavia ominaisuuksia ovat vähäinen tuotantopanosten vaatimus ja vähäiset maan kasvihuonekaasupäästöt, kyky kasvaa äärimmäisissä tai vaihtelevissa oloissa sekä hyvä veden- ja ravinteidenkäytön tehokkuus. Viljelijän näkökulmasta peltobioenergiakasvin on oltava helppo ja halpa perustaa ja korjata. Peltobioenergiakasvin sadon monipuolinen käyttömahdollisuus, muun muassa viljelystä muodostuvien sivutuotteiden kautta ja ekosysteemipalveluiden ylläpito tai lisääminen, on myös haluttava ominaisuus ympäristön ja viljelijän näkökulmasta (Davis ym 2013).

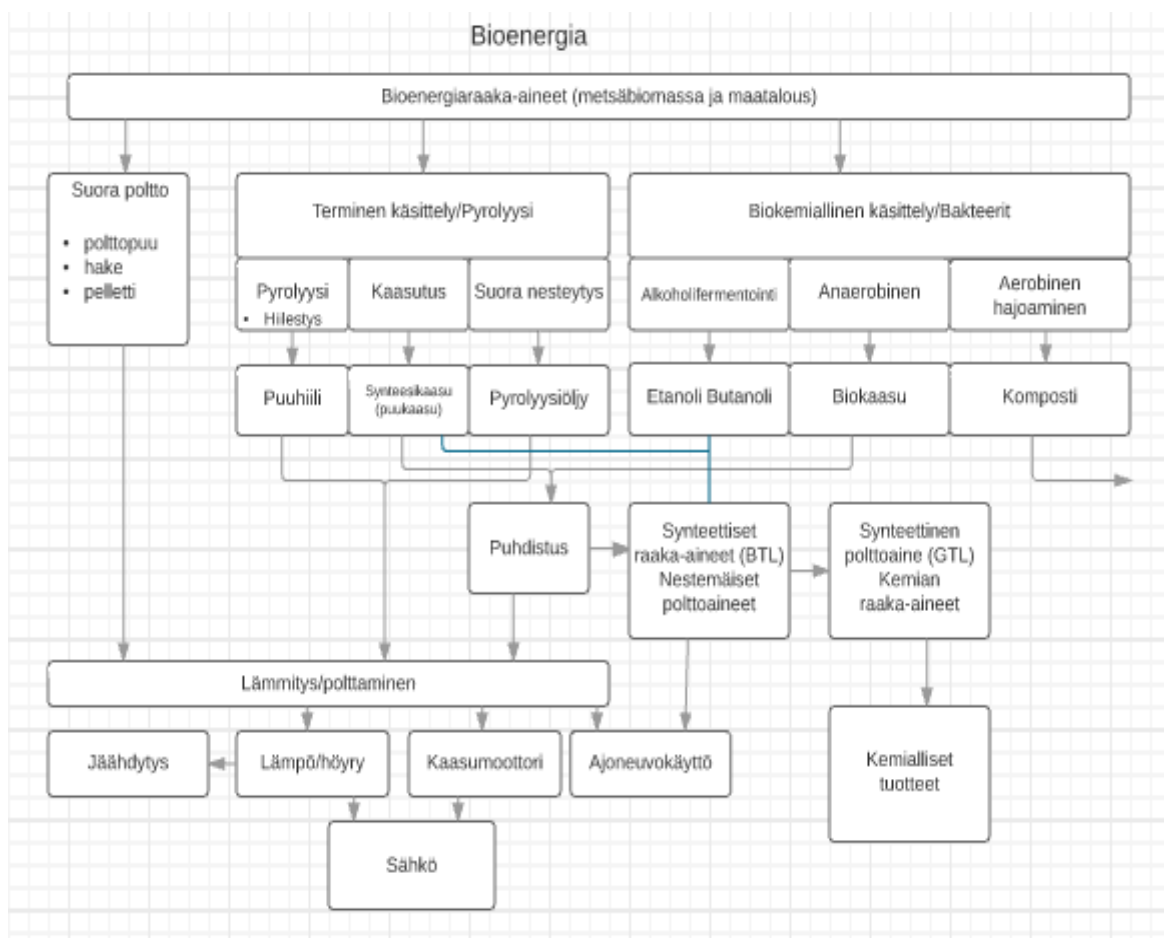
Hamppu (*Cannabis sativa* L.) on eräs maailman vanhimmista viljelykasveista. Perinteisesti hamppua on käytetty kuiduksi ja öljyksi sekä lääkinnällisten vaikutusten takia. Hamppu tuottaa runsaan kuiva-ainesadon suhteellisen pienellä lannoituksella (Prade ym. 2011), mistä

johtuen hamppu on hyvä vaihtoehto peltobioenergiakasviksi. Maissi (*Zea mays* L.) on myös perinteinen viljelykasvi, jolla on erittäin suuri kuiva-aineen tuottokyky ja jonka kuiva-aine soveltuu laadultaan erinomaisesti sekä rehuksi että bioenergian raaka-aineeksi, esimerkiksi etanolin ja biokaasun tuotantoon (Godin ym. 2013a ja 2013b, Pakarinen ym. 2011). Tällä hetkellä EU:n alueella käytetystä energiasta 0,8–2,0 EJ/vuosi on peräisin peltobioenergiakasveista. Määrän arvellaan nousevan 4,3–6,0 EJ/vuosi vuoteen 2030 mennessä ja etenkin lignoselluloosa pitoisen kasvimassan, kuten hampun ja maissin kuiva-aine, osuus tuotetun energian raaka-aineena arvellaan kasvavan huomattavasti (Bentsen & Felby 2012).

Tutkimuksen tarkoituksena oli arvioida hampun ja maissin kenttäkokeiden perusteella lajijominaisuuksia peltobioenergiakasveina Suomessa sekä eri lajikkeiden välisiä eroja.

2 KASVIEN KUIVA-AINE ENERGIAN TUOTANNON RAAKA-AINEENA

Kasvien kasvullisten osien sisältämä kemiallinen energia voidaan vapauttaa hajottamalla hiili- (C), vety- (H) ja happimolekyylejä yhdistävät sidokset toisistaan joko polttamalla tai mädättämällä (Kuva 2; Granö 2011, Byrt ym. 2011, McKendry 2002). Vapautettavissa oleva energiamäärä on suoraan suhteessa kasvimassan sisältämän kuiva-aineen määrään riippumatta energiantuotantomenetelmästä (Davis ym. 2013, Prade ym. 2011, Godin ym. 2013a ja b, Byrt ym. 2011, McKendry 2002). Peltobioenergiantuotannossa onkin siis ensisijaisesti keskityttävä tekijöihin, joilla pystytään vaikuttamaan kuiva-ainesadon muodostumiseen. Kuiva-ainesadon tärkeimmät laatutekijät, kuten kosteus, tuhkan- ja alkalimetallien sekä muiden alkuaineiden pitoisuudet, vaikuttavat siihen, mikä prosessointimenetelmä soveltuu erälle parhaimmin (Byrt ym. 2011, McKendry 2002).



Kuva 1. Yhteenveto mahdollisista menetelmistä muuntaa kasvimassa pohjainen raaka-aine energiaksi, muodostuvan energian hyödyntämisvaihtoehdot ja keskeisimpien menetelmien pääpiirteet (Granö 2011)

2.1 Kuiva-aineen muodostuminen

Kasvit tarvitsevat kuiva-aineen muodostamiseen vettä, ravinteita, säteilyä ja lämpöä. Kaikki fotosynteesiä rajoittavat tekijät voivat rajoittaa myös kuiva-aineen tuotantoa (Vapaavuori & Aro 1990). Kuiva-aineen muodostuminen voidaan laskea kertomalla säteilynkäytön tehokkuus vastaanotetun säteilyn määrällä (400–700 nm) (Byrt ym. 2011). Kasvin säteilyn vastaanottokykyyn vaikuttaa lehtien pinta-ala maa-alaa kohden (LAI), lehtien muoto, kasvukulma sekä lehtien pintarakenteet (Byrt ym. 2011). Tehokas säteilyn vastaanottaminen edellyttää kasvustolta laajaa lehtialaa ja tasaisesti maan peittävää kasvustoa. Säteilynkäytöntehokkuuteen vaikuttavat kasvin elinolosuhteet, kuten lämpötila, veden ja ravinteiden saatavuus sekä perinnölliset tekijät kuten C-sidontamekanismit (Vapaavuori & Aro 1990).

Kasvit jaetaan C-sidontamekanismin perusteella C₃-, C₄- sekä CAM-kasveihin. C₄-kasvien fotosynteesin tehokkuus perustuu kykyyn konsentroida hiilidioksidia (CO₂) jopa kymmenkertainen määrä ilmakehän CO₂-pitoisuuteen verrattuna pumppaamalla sitä johtojänteitä ympäröiviin RuBiscoa (ribuloosi-1,5-bisfosfaattikarboksylaasi/oksygenaasi) sisältäviin soluihin, joissa fotosynteesi tapahtuu lähes kokonaan ilman fotorespiraatiota (valohengitys) (Long 1983, Monson ym. 1984, Vapaavuori & Aro 1990, Byrt ym. 2011). C₃-kasvien yhteyttävissä soluissa CO₂-pitoisuus on alhaisempi, jolloin RuBisco saattaa CO₂:n asemasta sitoa happea (O₂), mikä alentaa huomattavasti fotosynteesitehokkuutta (Vapaavuori & Aro 1990). C₄-kasvien fotosynteesin tehokkuus C₃-kasveihin verrattuna riippuu lämpötilasta, koska korkeassa lämpötilassa (>30°C) C₃-kasvien ilmaraot sulkeutuvat ja O₂ konsentraatio nousee yhteyttävissä solukoissa ilman erillistä CO₂:n pumppausmekanismia (Byrt ym. 2011, Monson ym. 1984, Long 1983). C₄-hiilensidonta vaatii toisaalta voimakkaan haihduntavirtauksen ja siitä johtuen se voi altistaa kasveja herkemmin kuivuudelle ja lisätä niiden tarvitsemää veden määrää haihduntavirtauksen ylläpitämiseksi, jonka mukana ravinteet kulkeutuvat juuristosta muualle kasviin (Long 1983). Kasvit käyttävät huomattavan määrän ottamastaan typestä (N) RuBisco-entsyymien muodostamiseen. C₄-kasvien typenkäytön tehokkuus voi olla etenkin korkeammassa lämpötiloissa parempi verrattuna C₃-kasveihin tehokkaamman yhteyttämisen ansiosta (Long 1983). Tämä johtuu C₄-kasvien yhteyttävien solukoiden korkeammasta CO₂-pitoisuudesta, minkä ansiosta niiden ei tarvitse kompensoida alhaista CO₂-pitoisuutta nostamalla RuBiscon pitoisuutta yhteyttävissä solukoissa C₃-kasvien tavoin (Long 1983). Yllämainitut tekijät vaikuttavat osaltaan siihen, että C₄-kasveilla, kuten maissilla, voi olla oikeissa olosuhteissa (lämpötila >30°C) huomattavan suuri kuiva-aineen tuotantopotentiaali, joka ylittää useimpien C₃-kasvien kuiva-aineen tuotantopotentiaalimäärässä, nopeudessa ja ravinteidenkäytön tehokkuudessa (Byrt ym. 2011, Long 1983, Vapaavuori & Aro 1990).

2.2 Energiantuotantoon soveltuvan kuiva-aineen laatuvaatimukset

2.2.1 Poltto

Kuiva-aine muodostuu pääasiassa kolmesta alkuaineesta, C:stä (30–60 % ka), hapestasta (O 30–40 % ka) ja H:stä (5–6 % ka), jotka ovat kuiva-aineen rakenteiden perustana olevien hiilihydraattien pääraaka-aineet ja joiden välisissä kemiallisissa sidoksissa suurin osa kuiva-aineen sisältämästä energiasta on sitoutuneena (Jenkins ym. 1998, Obernberger ym.

2006). Näiden lisäksi kuiva-aineessa esiintyy kaikkia kasveille välttämättömiä alkuaineita, joista saattaa aiheutua haittaa epätäydellisen palamisen seurauksena joko prosessointilaitteistolle tai ympäristölle. Polttoprosessissa tavoitteena on kuiva-aineen täydellinen hapettaminen hiilidioksidiksi (CO_2) ja vedeksi (H_2O). Epätäydellisen palamisen seurauksena voi vapautua haitallisia kaasuja kuten hiilimonoksidia, hiilivetyjä, polysyklisiä hiilivetyjä sekä tervaa ja nokea (Oberberger ym. 2006).

Typpi (N) on yksi keskeisimpiä kasvien tarvitsemista makroravinteista. Se voi muodostaa ongelmia polttoprosesseissa, mikäli sen pitoisuus on yli 0,6 % kuiva-aineesta (Oberberger ym. 2006). N muuttuu palaessaan pääasiassa haitattomaan kaasumaiseen muotoon (N_2), mutta runsaasti N:ä sisältävän kuiva-aineen tai epätäydellisen palamisen seurauksena siitä voi muodostua erittäin haitallisia kasvihuonekaasuja, typpioksideja (NO_x). Kloori (Cl) voi muuttua palaessaan useaksi haitalliseksi syövyttäväksi yhdisteeksi, kuten suolahappo (HCl), kloorikaasu (Cl_2), kaliumkloridi (KCl) ja natriumkloridi (NaCl), jotka aiheuttavat korroosiota ja siten heikentävät metallista valmistettujen prosessointilaitteiden kestävyyttä (Oberberger ym. 2006). Alkalimetallit, muun muassa kalium (K), natrium (Na), ja pii (Si) reagoivat herkästi Cl:n kanssa. Epätäydellisen palamisen seurauksena Cl voi muodostaa lisäksi myrkyllisiä dioksiineja (dibentso-*p*-dioksiinit ja dibentsofuraanit PCDD/F), jotka voivat kertyä ihmisten ja eläinten kudoksiin (Oberberger ym. 2006). Suositeltavana Cl:n enimmäispitoisuutena voidaan pitää 0,1 %:a kuiva-aineesta korroosion välttämiseksi ja 0,3 %:a dioksiinien muodostumisen välttämiseksi (Oberberger ym. 2006). Rikki (S) muodostaa Cl:n tavoin syövyttäviä yhdisteitä ja sen suositeltava enimmäispitoisuus on myös 0,1 %:a kuiva-aineesta korroosion estämiseksi (Oberberger ym. 2006). S muodostaa lisäksi kaasumaisia oksideja (SO_x), jotka voivat ilmakehässä reagoida veden kanssa muodostaen lopulta rikkihappoa (H_2SO_4) tai ympäristöä happamoittavaa sulfaattia (SO_4). S-pitoisuuden rajana oksidien syntymisen ehkäisemiseksi voidaan pitää 0,2 %:a kuiva-aineesta (Oberberger ym. 2006). Tuhka on palamisprosessista ylijääneiden aineiden seos, jossa on kaikki kaasuuntumatta jääneet kuiva-aineen sisältämät aineet. Kuiva-aineen alkuainekoostumus määrittää polttamisessa syntyneen tuhkan määrän ja laadun, kuten sulamispisteen. Palamisen kannalta hyvälaatuinen kuiva-aine sisältää mahdollisimman vähän kaikkea muuta kuin C:ä, O:a ja H:ä, minkä lisäksi se on mahdollisimman kuivaa, koska tällöin tuhkan määrä jää mahdollisimman pieneksi, palaminen on mahdollisimman täydellistä, eikä veden poistamiseen kulu energiaa (Oberberger ym. 2006). Palamisessa kaasuuntumatta jääneet alkuaineet (muun muassa Ca, K ja Mg) voivat reagoida keskenään muodostaen palamiskammiossa polttoprosessia haittaavia sedimenttejä, jotka voivat kertyä laitteistojen pintaan tai vielä palamatta olevan massan päälle estäen täydellisen palamisen ja siten alentaa tuhkan

sulamispistettä (Oberberger ym. 2006). Kuiva-aineen polttamiseen perustuvat energiantuotantomenetelmät soveltuvat raaka-aineille, jotka ovat liian heikkolaatuisia etanolin tai biokaasun tuotantoon. Tämä johtuu siitä, että polttamisen kaltaisella nopealla hapetusmenetelmällä pystytään hyödyntämään tuhkaa lukuun ottamatta koko kuiva-ainemassa, eikä vain helposti liukoiseen muotoon saatavaa osaa kuiva-ainemassasta. Polttomenetelmän valinnalla sekä palokaasujen puhdistuslaitteistoilla pystytään hallitsemaan huonolaatuisten erien aiheuttamia ongelmia, vaikka toisaalta puhdistuslaitteistojen lisääminen tuotantojärjestelmään nostaa tuotantokustannukset (Oberberger ym. 2006).

2.2.2 Etanolin tuotanto

Bioetanolin tuotannossa oleellista on raaka-aineen sisältämien sokerien määrä ja liukoisuus. Sokerien liukoisuus kuvaa sitä, miten helposti ja paljon raaka-aineesta pystytään irrottamaan sokereita käymisprosessia ylläpitävien organismien ravinnoksi (Lee 1997, Byrt ym. 2011). Mono- ja disakkaridit ovat liukoisia sokereita, joiden mahdollisimman korkea pitoisuus on etanolin valmistuksen kannalta tärkein kuiva-aineen laatuksiteeri. Lignoselluloosapitoisen kuiva-aineen liukoisten sokereidenpitoisuutta voidaan nostaa molekyyliirakenteita hajottamalla. Esimerkiksi kasvimassan mekaaninen murskaaminen/hienontaminen tai entsyymikäsittely, vapauttavat liukoisia sokereita, jolloin lähtökohtaisesti niukasti liukoisia sokereita sisältävän kuiva-aineen käyttökelpoisuutta etanolintuotannossa voidaan parantaa huomattavasti (Pakarinen ym. 2011, Lee 1997). Yksinkertaistettuna bioetanolintuotannossa kasvien rakenteellisiin osiin tiukasti sitoutuneet hiilihydraatit, selluloosa ja hemiselluloosa, irrotetaan ligniinirungosta muun muassa bakteerien entsyymitoiminnan ja mekaanisen prosessoinnin avulla, minkä jälkeen ne hajotetaan edelleen pienempiin ja liukoisempiin muotoihin, kunnes ne ovat käymisprosessia ylläpitäville organismeille soveltuvaa ravintoa (Lee 1997). Bioetanolin tuotantoprosessi voi vaatia etenkin alkuvaiheessa helppoliukoisen sokerin lisäämistä kuiva-aineen sekaan organismien ravinnoksi, jotta niillä on riittävästi energiaa selviytyäkseen vaiheesta, jossa kuiva-aineessa olevat sokerivarannot eivät ole ehtineet hajota riittävän liukoiseen, ravinnoksi kelpaavaan muotoon (Lee 1997). Kuiva-aineen esikäsittely ja sokerin lisääminen tuotantoprosessiin alentavat siitä saatavan nettoenergian määrää, joten toistaiseksi etanolin tuotantoon on kannattavinta ohjata vain erittäin sokeripitoista kuiva-ainetta (Lee 1997).

2.2.3 Biokaasun tuotanto

Biokaasu on pääasiassa metaanin (CH_4) ja hiilidioksidin (CO_2) sekä vähäisessä määrin muiden kaasujen, kuten vetysulfidin (H_2S) seos, jota voidaan valmistaa kuiva-aineesta anaerobisen mädätysprosessin kautta. Biokaasun valmistuksessa on mukana useita bakteerikantoja prosessin eri vaiheissa. Prosessi kestää raaka-aineesta ja menetelmästä riippuen kokonaisuudessaan noin 30–50 vuorokautta. Biokaasun valmistuksen merkittävimmät vaiheet ovat hydrolyysi, asidogeneesi, asetogeneesi ja metanogeneesi, jotka tapahtuvat pääasiassa samanaikaisesti (Boontian 2013). Hydrolyysissä monimutkaiset orgaaniset yhdisteet hajotetaan pienemmiksi yhdisteiksi hydrolyyttisten ja asetogeenisten bakteerien erittämien entsyymien avulla, jonka seurauksena yhdisteiden biosaatavuus metanogeenisten bakteerien ravinnoksi paranee. Asetogeeniset bakteerit puolestaan hapettavat alkoholit ja haihtuvat rasvahapot yksinkertaisemmiksi yhdisteiksi. Asetaatit, H ja CO_2 soveltuvat ravinnoksi sellaisinaan metanogeenisille bakteereille, jotka tuottavat varsinaisen biokaasun. Koska biokaasu muodostuu bakteerien elintoimintojen sivutuotteena, raaka-aineen hyvää laatua kuvaavat bakteerien ravitsemuksen ja elinympäristön kannalta tärkeät tekijät, kuten pH, lämpötila, saatavilla olevat alkuaineet ja niiden suhde toisiinsa (esimerkiksi C/N) sekä biokaasureaktorin malli. Kuiva-aineen korkeaa laatua biokaasun raaka-aineena kuvaavat lähinnä sen sisältämät alkuaineet, sillä muut biokaasun valmistuksessa merkittävät tekijät (pH, lämpötila jne.) ovat riippuvaisia lähinnä prosessointitekniikasta, joihin raaka-aineen laadulla ei juuri pystytä vaikuttamaan (Boontian 2013).

Biokaasun valmistus alkaa yleensä kasvimassan esikäsitteilyllä, esimerkiksi silppuaminen tai lämpökäsittely, joka lisää kuiva-aineen reaktiivista pinta-alaa ja parantaa sen sisältämien alkuaineiden liukoisuutta (Boontian 2013). Anaerobiset olot luodaan kontrolloimalla raaka-aineen kosteuspitoisuutta, jolloin kasvimassan joukkoon lisätään usein vettä. Tästä syystä kasvimassan suuri kosteuspitoisuus on toivottavaa biokaasun valmistukseen toimitettaville erille. Ravinnerikkaat ja mahdollisimman kosteat erät ovatkin laadultaan parhaita biokaasun tuotantoon (Boontian 2013). Suositeltava C/N-suhde on 15–20 (Speece & McCarty 1964, Boontian 2013, Srivastava 1981) ja C/P-suhde <75, jotta bakteereilla on riittävästi, muttei liikaa, N:ä ja P:a elintoiminnoilleen suhteessa hajotettavien hiiliyhdisteiden määrään (Speece & McCarty 1964, Srivastava 1981). N:n ja P:n lisäksi bakteerit tarvitsevat myös epäorgaanisia ravinteita elintoimintojen ylläpitoon. Metanogeeniset bakteerit tarvitsevat rautaa (Fe), kobolttia (Co), nikkeliä (Ni) ja sulfidia (H_2S) pystyäkseen muuntamaan asetaatin metaaniksi. Lisäksi wolframi (W), molybdeeni (Mo) ja seleeni (Se) ovat metanogeenisten

bakteerien tarvitsemia ravinteita. Bakteereille välttämättömien ravinteiden suosituspitoisuudet biokaasun raaka-aineessa eivät ole selkeät johtuen biokaasun tuotannon kemiallisten prosessien monimutkaisuudesta, joissa tarvittavat alkuaineet voivat olla esimerkiksi muodossa, jossa bakteerit eivät pysty niitä hyödyntämään. Raskasmetallit ja tarpeellisten ravinteiden liian korkea pitoisuus, esimerkiksi $S > 100\text{--}150\text{ mg/l}$, ovat myrkyllisiä metaania muodostaville bakteereille (Speece 1983). Kuiva-aine ei yleensä sisällä kaikkia bakteerien tarvitsemia ravinteita, ainakaan riittävässä määrin, jolloin tehokas biokaasun tuotanto vaatii yleensä lisäravinteiden käyttämistä bakteerien ravinteidentarpeen tyydyttämiseksi (Speece 1983, Saidu ym. 2014).

3 HAMPPU JA MAISSI PELTOBIOENERGIAKASVEINA

3.1 Hamppu

3.1.1 Hamppu

Yksivuotinen ja pääasiallisesti kaksikotinen hamppu kuuluu hamppukasvien (*Cannabaceae*) heimoon (Kuva 1; Mossberg & Stenberg 2012). Hampun korkeus voi vaihdella huomattavasti lajikkeesta ja ympäristöoloista riippuen 0,5-3,0 m. Hampun lehdet muodostuvat suikeista sahalaitaisista 5–7 sormisista lehdyköistä joissa on nystykarvoja. Alemmat lehdet kasvavat vastakkain ja ylemmät kierteisesti. Hedekukinnot ovat 5-lukuisia terttuina riippuvia norkkoja ja emikukat tähkiä. Hampun hedelmä on litteä, kalju ja sileä 3-4 mm pitkä teräväreunainen ja munanmuotoinen pähkylä. Väriykseltään pähkylä on harmahtava ja hie-man kiiltävä. Hampun tuoksu on voimakas (Mossberg & Stenberg 2012).



Kuva 2. Hampun rakenteet (Köhler 1879). A: hedekasvi, B: emikasvi. 1: hedekukinto, 2: heteen ponsi, 3: avautunut heteen ponsi, 4: siitepölyhiukkanen, 5: emikukka, 6: emikukka ilman suojuslehteä, 7: kehittyvä siemen, 8: kypsyvä siemen suojuslehden sisällä, 9: kypsä siemen päältä kuvattuna, 10: kypsä siemen sivulta kuvattuna, 11: siemen läpi leikattuna, 12: siemen halkaistuna pitkittäin, 13: siemen puhdistettuna emikukan jäännöskalvoista.

Hampun yksi- ja kaksikotisten lajikkeiden välillä on havaittavissa joitakin eroja. Hampun kaksikotiset lajikkeet ovat yleensä keskimäärin pidempiä (1,86–2,00 m) verrattuna yksikotisiin lajikkeisiin (133–137 cm) (Sankari & Mela 1998, Cosentino ym 2013). Kaksikotiset lajikkeet ovat lisäksi tanakampia kuin yksikotiset lajikkeet. Kaksikotisten lajikkeiden varret ovat halkaisijaltaan mitattuna 0,1 m maan yläpuolelta noin 9 mm paksuja ja yksikotisten lajikkeiden noin 6 mm (Cosentino ym. 2013).

Hamppu on syväjuurinen kasvilaji ja se pystyykin kasvattamaan juurensa jopa 1,3–2,0 m syvyyteen (Amaducci ym 2008). Hampun juuristosta 50 % sijaitsee päällimmäisessä 0,5 m maakerroksessa. Juuristo on tiheimmillään ensimmäisessä 0,1 m tai ensimmäisessä 0,2 cm kerroksessa, riippuen siitä, huomioidaanko pääjuuren massa mukaan (Amaducci ym 2008). Hampun vahvan vertikaalisen pääjuuren massa huomioituna 50 % juuristosta sijaitsee päällimmäisessä 0,2 cm maakerroksessa (Amaducci ym 2008). Hampun maanpäällisen ja maanalaisen kasvimassan suhde on 5,46 vuodesta riippumatta, ja juuristomassa voi vaihdella 2,41–3,21 KA t/ha (Amaducci ym 2008).

3.1.2 Hampun elinkaari

Hampun elinkaaresta voidaan erottaa neljä eri päävaihetta: itäminen ja taimettuminen, kasvullinen vaihe, kukinta ja siementen muodostuminen sekä lakastuminen (Taulukko 1: Médiavilla ym. 1998, Amaducci ym. 2012). Eri päävaiheiden kesto riippuu hampun kasvuoloista, etenkin lämpötilasta ja säteilynintensiteetistä (Desanlis ym. 2013). Ensimmäinen päävaihe, jonka lopussa hampun sirkkataimet ovat havaittavissa, vaatii noin 80–100 °C lämpösumman kertymistä (Desanlis ym. 2013). Kasvullinen vaihe, jonka päättyessä hampukasvissa on yleensä vähintään kolme lehtiparia, vaatii noin 250 °C lämpösumman (Desanlis ym. 2013). Hamppu on pääsääntöisesti lyhyen päivän kasvi. Sen kukintaan virittäytyminen vaatii riittävän lämpösumman kertymisen lisäksi sopivaa päivänpituutta. Kukinnan virittäytymiseen riittää yksi vuorokausi optimaalisessa lämpötilassa (19–25 °C) ja 14 tunnin päivänpituudessa (Amaducci ym. 2012). Suomen pitkä päivä kesällä, pisimmillään noin 19 h, estää useiden hamppulajikkeiden kukinnan, jolloin osa lajikkeista ei kuki Suomessa lainkaan ja ne jäivät vegetatiiviseen kehitysvaiheeseen (Sankari & Mela 1998, Amaducci ym. 2012). Hampun koko elinkaari tarvitsee 2500–3000 °C lämpösumman (peruslämpö +5 °C), olettaen ettei säteilynintensiteetti rajoita kehitystä (Desanlis ym. 2013).

Taulukko 1. Hampun (*Cannabis sativa* L.) kasvuvaiheet (Médiavilla ym. 1998)

	Koodi	Määritelmä	Havaittavissa
<u>Itäminen ja taimettuminen</u>			
	0000	Kuiva siemen	
	0001	Sirkkajuuri havaittavissa	
	0002	Alkeisvarsi havaittavissa	
	0003	Sirkkalehdet avautuneet	
<u>Kasvullinen vaihe</u>			
	1002	1. lehtipari	1 lehdykkä
	1004	2. lehtipari	3 lehdykkää
	1006	3. lehtipari	5 lehdykkää
	10xx	n. lehtipari	
<u>Kukinta ja siementen muodostuminen</u>			
	2000	Kukintaan virittäytyminen	Lehtiasennon muutos vastakkaisesta vuorottaiseen
	2001	Kukkien esiaiheiden muodostuminen	Sukupuoli heikosti erotettavissa
Kaksikotiset kasvit Hedekasvit	2100	Kukkien muodostuminen	Ensimmäiset hedekukinnot
	2101	Kukinnan alkaminen	Ensimmäiset avautuneet hedekukinnot
	2102	Kukinta	50 % hedekukinnoista on avautunut
	2103	Kukinnan päättyminen	95 % hedekukinnoista on avautunut tai lakastunut
Emikasvit	2200	Kukkien muodostuminen	Ensimmäiset suojuslehdet ilman varsinaisia kukintoja
	2201	Kukinnan alkaminen	Ensimmäisten emikukintojen vartalot
	2202	Kukinta	50 % suojuslehdistä muodostunut
	2203	Siementen kypsyminen alkaminen	Ensimmäiset kovat siemenet
	2204	Siementen kypsyminen	50 % siemenistä kovia
	2205	Siementen kypsyminen päättyminen	95 % siemenistä kovia tai irronneita
Yksikotiset kasvit	2300	Emikukintojen muodostuminen	Ensimmäiset suojuslehdet ilman varsinaisia kukintoja

2301	Emikukintojen kukinnan alkaminen	Ensimmäiset emikukinnot nähtävissä
2302	Emikukintojen kukinta	50 % suojuslehdistä nähtävissä
2303	Hedekukintojen muodostuminen	Ensimmäiset hedekukinnot
2304	Hedekukintojen kukinta	Suurinosa hedekukinnoita on avautunut
2305	Siementen kypsymisen alkaminen	Ensimmäiset kovat siemenet
2306	Siementen kypsyminen	50 % siemenistä kovia
2307	Siementen kypsymisen päättyminen	95 % siemenistä kovia tai irronneita

Lakastuminen

3001	Lehtien kuivuminen	Kuivat lehdet
3002	Varsien kuivuminen	Lehtien variseminen
3003	Varsien maatumisen	Kuitujen hajoaminen

3.1.3 Viljely

Hampun viljely onnistuu mailla, jotka läpäisevät hyvin vettä ja joiden pH on korkea, 6–8 (Desanlis ym. 2013). Kasvun alkuvaiheessa hamppu voi olla arka kuivuudelle tai liialliselle vedelle (Sankari & Mela 1998, Struik ym. 2000). Hamppu muodostaa yhtä paljon satoa sekä tiheissä että harvoissa kasvustoissa. Esimerkiksi kuiva-ainesato oli sama kylvötiheyden vaihdella 30:stä 270:en kpl/m² (Struik ym 2000, Desanlis ym. 2013). Tämä johtuu siitä, että hampulla lajin sisäinen kilpailu elintilasta on voimakasta ja tiheet kasvustot (180–270 kpl/m²) harventuvat itsekseen kasvukauden aikana (110–180 kpl/m²). Harvoissa (30–90 kpl/m²) kasvustoissa kasvustotiheys säilyy lähes muuttumattomana läpi kasvukauden.

Hampun lannoitustarve riippuu tuotetun kuiva-aineen määrästä. Lannoitussuositus kuiva-ainetonnina kohden on 18–24 kg N, 5–10 kg P, 20–40 kg K, 30–40 kg Ca ja 8–10 kg Mg. Hamppu kannattaa kylvää maan lämpötilan kohottua pysyvästi +8–10 °C (Desanlis ym. 2013). Hampun fotosynteesi on optimissaan noin +24 °C lämpötilassa ja alkaa lineaarisesti laskea +27 °C ylittyessä ylärajaan, +43 °C, saakka (Cosentino ym. 2013).

Hampun siementen sopiva kylvösyvyys on noin 2–3 cm ja itävyyttä voidaan parantaa jyräällä kylvetty alue. Hampulla ei juurikaan ole kasvitauteja. Joissakin tapauksissa saattaa kuitenkin esiintyä harmaahometta (*Botrytis cinerea* Pers.) ja pahkahometta (*Sclerotinia sclerotinium* de Bary), joita voidaan tarvittaessa torjua kemiallisesti fungisideillä. Viileä ja

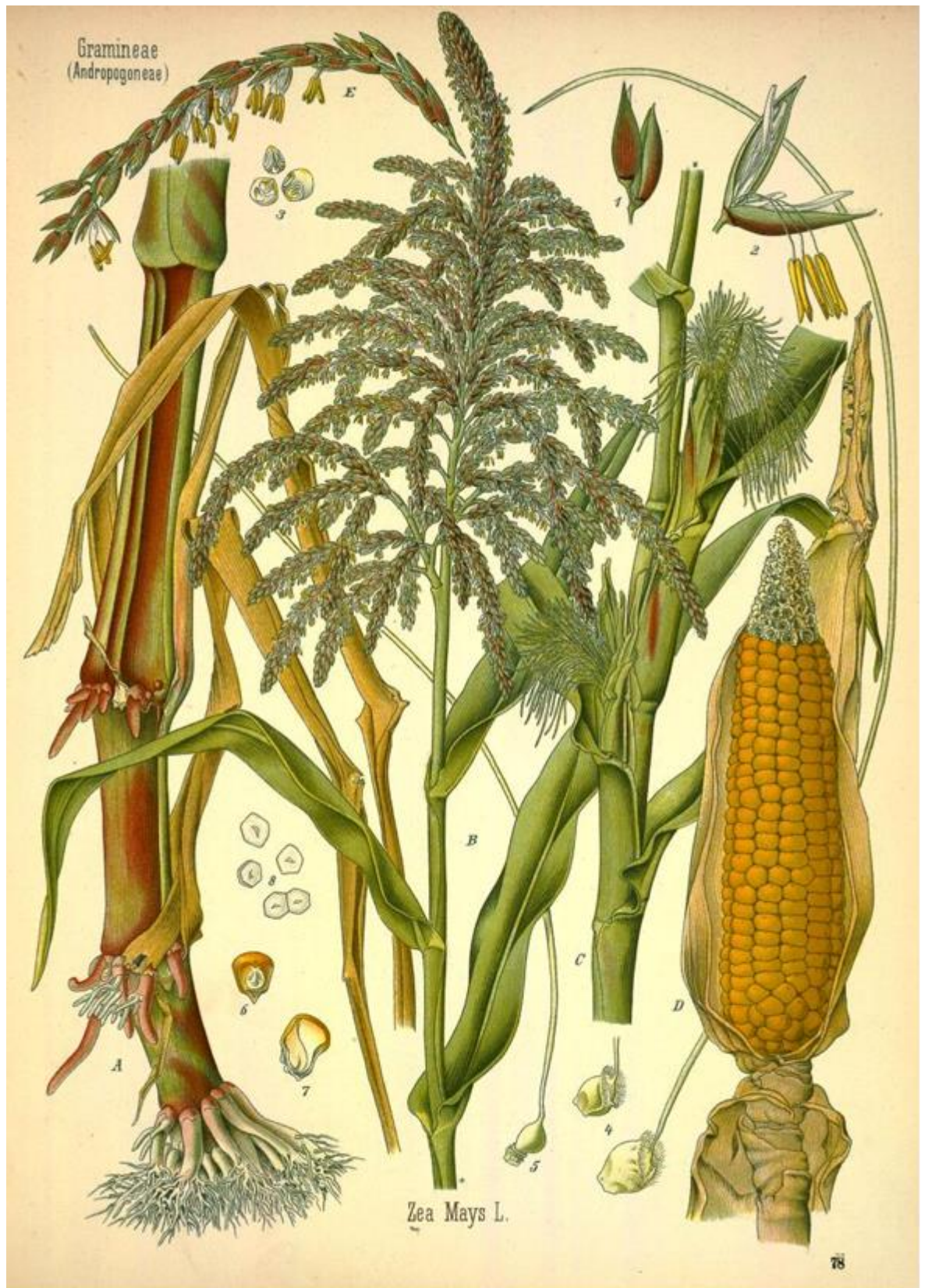
kosteaa ilmasto altistaa hampukasvustoja taudeille. Hampulla ei juurikaan ole tuhohyönteisiä, vaikka jotkin toukat ja koiperhoset voivat satunnaisesti käyttää hampua ravintonaan (Desanlis ym. 2013).

Hampun kaikki kasvinosat sisältävät psykoaktiivisia tetrahydrokannabinoli-yhdisteitä (THC), mistä johtuen vain virallisiin lajikeluetteluihin hyväksytyjä lajikkeita saa laillisesti ja viljelijä-tukiin oikeutettuna viljellä EU:n alueella. Euroopan komissio on tehnyt asetuksen THC:n enimmäismäärästä, joka on 0,20 % kuiva-ainemassasta (European Commission 2008). Hampukasvustojen THC-pitoisuutta seurataan kasvustonäytteillä, joiden pitää edustaa vähintään 30 % vuotuisesta hampun viljelyalasta. Kasvustonäytteet otetaan, kun kukinnan alkamisesta on kulunut 20 vuorokautta, kuitenkin viimeistään, kun kukinnan päättymisestä on kulunut 10 päivää (Euroopan yhteisöjen komissio 2009). Poikkeuksena on Suomessa yleisesti viljelty öljyhampulajike Finola (Järvenranta & Virkajärvi 2002), josta näytteet kerätään 55–75 vuorokauden kuluttua kylvämisestä (Mavi 2014). Näyte otetaan päivällä ja sen tulee olla vähintään 30 cm pitkä kasvinosa, joka sisältää vähintään yhden emikukinnon. Varsinainen THC-pitoisuusanalyysi tehdään näytteen kukinnoista ja lehdistä (Euroopan yhteisöjen komissio 2009).

3.2 Maissi

3.2.1 Maissi

Maissi (*Zea mays L.*) on yksivuotinen, yleensä noin 100–250 cm korkea, heinäkasvien (*Poaceae*) heimoon kuuluva, alun perin Meksikosta kotoisin oleva viljelykasvi. Maissilla on tanakka ja kiiltävä varsi. Sen lehdet ovat 2,5–10,0 cm leveitä, karvareunaisia ja sileitä. Lehtien alapinnat ovat kiiltävät, ja niiden tupet ovat väljiä ja kaljuja. Hedekukinto on suurikokoinen pysty latvaröyhy, emikukat sijaitsevat lehtituppjen suojassa. (Kuva 3; Mossberg & Stenberg 2012).



Kuva 3. Maissin rakenteet (Köhler 1898). A: varsi, B: hedekukinto, C: emikukinto, D: tähkä, E: osa hedekukinnosta, 1: sulkeutunut hedekukka, 2: hedekukka, 3: siitepölyhiukkanen, 4: emikukka, 5: kehittyvä jyvä, 6: jyvä edestä kuvattuna, 7: jyvä sivusta katsottuna, 8: halkais-
tuja jyviä

3.2.2 Maissin elinkaari

Maissin elinkaari voidaan jakaa kasvulliseen ja suvulliseen vaiheeseen (Reitsma ym. 2009). Maissin elinkaari alkaa siemenen itämisellä ja taimettumisella (VE). Kasvullista vaihetta seurataan laskemalla näkyvillä olevien lehtien kielekkeiden lukumäärää (V1, V2...Vn), kunnes maissin hedekukinto tulee esille (VT) ja suvullinen vaihe alkaa. Maissin emikukinnot alkavat kehittyä, kun noin kuusi lehden kielekettä on näkyvillä (V6) ja kärkikasvupiste nousee maanpinnan yläpuolelle. Tämän jälkeen maissi on äärimmäisen arka esimerkiksi hallan aiheuttamille vaurioille. Maissin kukinnan jälkeen jyvänaiheet täyttyvät ja siirtyvät maitovaiheen kautta taikinavaiheeseen, kunnes lopulta tuleentuvat. Maissin koko elinkaari vaatii kokonaisuudessaan yli 1500 °C lämpösumman kertymisen (peruslämpö 10 °C) (Taulukko 2; Reitsma ym. 2009).

Taulukko 2. Maissin kasvuvaiheet ja keskimääräisen kasvuajan (120 vuorokautta) vaativan lajikkeen kasvuvaihetta vastaava kertynyt lämpösumma (peruslämpö 10 °C) kylvöstä alkaen Reitsma ym. (2009) mukaan.

Koodi	Lämpösumma °C	Havaittavissa
<u>Vegetatiivinen vaihe</u>		
V0		Kuiva siemen
VE	74–102	Sirkkalehti nähtävissä
V1	111–138	Ensimmäinen lehden kieleke näkyvillä
V2	147–175	Toinen lehden kieleke näkyvillä
V3	184–212	Kolmas lehden kieleke näkyvillä
Vn		n:s lehden kieleke näkyvillä
VT	803–831	Hedekukinto selkeästi näkyvillä
<u>Generatiivinen vaihe</u>		
R1	853–1012	Kukinta
R2	1039–1122	Jyvän täytyminen, neste kirkasta, jyvän kosteus 85 %
R3	1150–1233	Maitovaihe
R4	1262–1345	Taikinavaihe
R5	1387–1553	Jyvien kovettuminen, jyvän kosteus 55 %
R6	1595–1623	Täystuleentuminen, jyvän kosteus 30–35 %

Maissin lehtikulmat suhteessa kasvin varteen ovat samankaltaisia lajikkeesta riippumatta muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta (Steward ym. 2003). Täysikasvuisessa kasvissa voi olla 9–18 lehteä ja sen lehtialaindeksi voi olla 1,53–6,00 m² lajikkeesta riippuen (Pellerin ym. 2000, Steward ym. 2003). Maissin lehtialaindeksi ja lehtien lukumäärä ovat huipussaan lämpösumman ylittäessä 800 °C. Lämpösumman ylittäessä 1200 °C lehtialaindeksi alkaa laskea kasvuston tuleentumisen käynnistymisen seurauksena (Pellerin ym. 2000). Maissin lehtien aktiivinen kasvu vaatii vähintään 10 °C lämpötilan (Long 1983). Yksittäisen kasvin tähkien lukumäärä voi vaihdella 5–10 lajikkeesta riippuen (Steward ym. 2003). C4-kasvina maissin nettofotosynteesi on tehokkaampaa C3-kasveihin verrattuna, kun lämpötila on riittävän korkea ($\geq +25^{\circ}\text{C}$) (Long 1983, Monson ym. 1984).

3.2.3 Viljely

Maissin viljelyala oli EU:n alueella vuonna 2011 noin 8–9 miljoonaa hehtaaria (European Commission 2012). Maissille sopivia maalajeja ovat lämpimät multa- ja hietamaat, joissa vesitalous on kunnossa. Tiiviit, liian kuivat tai märät maat alentavat sen satopotentiaalia (Hall ym. 2009). Maissi kannatta kylvää maan lämpötilan noustua pysyvästi vähintään +10 °C:een (Miedema 1982, Hall ym. 2009, Farnham 2001). Alle +10 °C lämpötilassa kylvetyt maissin siemenet imevät itseensä vettä, mutta eivät kykene kasvattamaan juuria tai versoja, jolloin ne ovat alttiita homeille ilman peittausta ja kasvusto voi taimettua hyvin epätasaisesti (Hall ym. 2009). Siementen taimettumisnopeuteen vaikuttaa ensisijaisesti maan lämpötila. Taimettuminen voi kestää jopa kolme viikkoa maan lämpötilan ollessa +10 °C ja vain muutamasta päivästä yhteen viikkoon +21 °C lämpötilassa (Farnham 2001). Esimerkiksi Suomessa voidaan kuitenkin viljellä onnistuneesti aikaisia, viileämpiin olosuhteisiin jalostettuja maissilajikkeita, jotka joudutaan kylvämään ennen kuin maan lämpötila on noussut yli suositeltavan minimilämpötilan. Maissin kylvösyvyys on noin 5 cm, kylvötiheys 60 000–90 000 kpl/ha ja rivivälinen etäisyys 76 cm (Hall ym. 2009, Farnham 2001, Miedema 1982). Kuiva-ainetonnin kohden maissin lannoitustarve on noin 12 N kg, 6 P kg ja noin 11 K kg (Clay & Reitsma 2009). Maissin esikasveiksi sopivat erinomaisesti palkokasvit ja ristikkukaiset kasvit, joiden jälkeen maissin kuiva-ainesadon sadonlisäys voi olla jopa 2 000 kg/ha (Clay & Moechnig 2009, Samarappuli ym. 2014). Rikkakasvit torjutaan tarvittaessa kemiallisesti tai mekaanisesti haraamalla rivivälit maissien ollessa pieniä. Rikkakasveja voidaan ennaltaehkäistä esimerkiksi viljelemällä aluskasveja sekä monipuolisella kasvinvuorotuksella. Rikkakasvit kilpailevat ravinteista ja elintilasta maissin kanssa. Maissi on erittäin herkkä kilpailulle taimivaiheessa, kasvuasteet V2–V8 (Taulukko 2), joten runsas rikkakasvien määrä voi alentaa satoa merkittävästi. Rikkakasvien määrä on siksi pyrittävä pitämään mahdollisimman vähäisenä etenkin nuorissa maissikasvustoissa (Clay & Moechnig 2009).

Maissin tuhohyönteisiä ovat esimerkiksi seppäkuoriaisen toukat, *Diabrotica barberi* Smith & Lawrence, *Diabrotica virgifera virgifera* LeConte, ja maissikoisa, *Ostrinia nubilalis* Hbn. Tuhohyönteisiä esiintyy lähes kaikissa maissin eri kasvuvaiheissa. Tästä johtuen tuhohyönteisten seuranta on tehtävä taimettumisesta taikinatulementumiseen saakka. Tuhohyönteisiä voidaan torjua esimerkiksi torjunta-aineilla ja kasvinvuorotuksella (Catangui ym. 2009). Maissikasvustoissa voi esiintyä lukuisia kasvitauteja lähes koko kasvuston elinkaaren ajan. Useita sienitauteja voidaan havaita maississa aina siemenestä, esimerkiksi taimipolte (*Pyt-*

hium ssp.), tuleentumiseen saakka, useat lehtilaikkutaudit kuten: *Setosphaeria turcica* (Luttrell) Leonard & Suggs (Martin 2011), *Cercospora zea-maydis* Tehon & Daniels, *Colletotrichum graminicola* (Ces.) ja ruosteet, *Puccinia ssp.*. Maissin bakteeritauteja, kuten *Erwinia stewardii* (Smith), *Clavibacter michiganensis* Vidaver & Mandel, ei toistaiseksi ole pidetty kovin merkittävänä. Maissilla on kaksi merkittävää virustautia, vehnän mosaiikkivirus (*Tenuivirus sp.* ja *Nucleorhabdovirus sp.*) ja maissin kääpiökasvuviroosi (*Potyvirus sp.*), joita levittävät tautien vektoreina toimivat tuhohyönteiset. Suvullisessa vaiheessa maissin tähkiin, hedekukintoon ja lehtiin voi kehittyä nokitauteja, *Ustilago maydis* (DC.) Corda, *Sphacelotheca reiliana* Kuhn, jotka voivat tuhota tartunnan saaneen kasvin sadon kokonaan. Jo tuleentuneissa tähkissä ja jyvissä voi esiintyä erilaisia home- ja sienitauteja, kuten *Fusarium ssp.*, *Aspergillus ssp.*, *Penicillium ssp.*, joista osa erittää mykotoksiineja, jotka voivat olla myrkyllisiä niitä syöville eläimille tai ihmisille. Typpi- ja kaliumlannoituksen epätasapaino altistaa maissikasvustoja erilaisille varsitaudeille liian nopean kasvun tai puutteellisen ravinteiden saannin seurauksena heikosti muodostuneiden varsien takia. Heikosti muodostuneet varret ovat alttiita sienitaudeille, kuten *Fusarium ssp.* ja *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Coid, joiden seurauksena ne voivat helpommin katketa ja lakoontua. Suurin osa maissin kasvitaudeista hyötyy kylmästä ja kosteasta ilmastosta. Kasvitautilien leviämistä edistävät hyönteisten aiheuttamat syöntivioitukset, joiden kautta ne pääsevät infektoimaan kasveja tehokkaasti. Tehokas tautien torjunta edellyttää kylvön oikeaa ajoittamista, kasvinvuorotusta, kasvijätteen huolellista käsittelyä ja tarvittaessa poistamista tautien leviämisen estämiseksi seuraavan vuoden kasvustoihin ja tuhohyönteisten torjuntaa torjuntakynnyksen ylittyessä. Eräs keino ehkäistä kasvitautilien ja tuhohyönteisten leviämistä ja vähentää kemiallisen kasvinsuojelun tarvetta on lajikevalinta, jolloin tietyille patogeenille tai tuhohyönteiselle immuuniksi jalostetulla kasvilla on luonnollinen vastustuskyky kasvintuhoojaa vastaan immunitettiin murtumiseen saakka (Draper ym. 2009).

3.3 Hampun ja maissin kuiva-aine energiantuotannossa

3.3.1 Hampun ja maissin kuiva-aineen muodostuminen ja siihen vaikuttavat tekijät: Säteilyn- ja vedenkäytön tehokkuus

Hampun säteilynkäytön tehokkuus voi olla 1,88–2,21 KA g/MJ PAR. Koko kasvukauden aikana hamppu voi muodostaa kuiva-ainetta 928–1200 g/m² (546,9–582,7 MJ PAR/m²) riippuen säteilynkäytön tehokkuudesta. Hampun vedenkäytön tehokkuus voi olla 2,73–3,45 KA

g/l riippuen veden saatavuudesta. Lajikkeiden erilaiset kasvuajat vaikuttavat veden kokonaistarpeeseen. Yksikotisten, aikaisten lajikkeiden vedentarve, 250 mm, on huomattavasti pienempi verrattuna kaksikotisten, pitkän kasvuajan vaativien lajikkeiden vedentarpeeseen, 450 mm, verrattuna (Cosentino ym. 2013).

Maissin säteilyn vastaanottamiskyky kasvukauden aikana voi vaihdella 286–687 MJ/m² lajikkeesta ja kasvuoloista riippuen. Samalla tavoin säteilynkäytön tehokkuus voi vaihdella 2,91–3,35 KA g/MJ PAR (Singer ym. 2011, Kaur ym. 2012). Maissi on kylmänarka kasvi ja sen säteilynkäytön tehokkuus voi laskea huomattavasti esimerkiksi aikaisen kylvön seurauksena viluttuneiden taimien hidastuneen kehityksen takia (Louarn ym. 2008). Maissin vedenkäytön tehokkuus voi olla 0,43–1,53 KA g/l, mutta yleensä lievä vedenpuute lisää vedenkäytön tehokkuutta (Howell 2001).

3.3.2 Satoisuus ja satopotentialit bioenergiantuotannossa

Kuiva-ainesato vaihtelee vuosittain monien eri tekijöiden seurauksena. Kuiva-ainesatoon vaikuttavat ympäristöolojen lisäksi kasvin perimä ja kasvuaika sekä korjuuajankohta (Godin ym. 2013a). Kuiva-ainesadon energiatiheys on lähes sama kaikissa lignoselluloosapitoisissa raaka-aineissa, vaikka joidenkin puumaisten raaka-aineiden energiatiheys voi olla hieman korkeampi kuin heinämäisten raaka-aineiden (Taulukko 3). Kuiva-aineen energiatiheys on hieman alle puolet polttoöljyn tehollisesta energiatihydestä, joka on noin 40 MJ/kg (Alakangas 2000). Polttoprosessien kannalta satoisuutta kuvaava bruttoenergiataso riippuu kuiva-aineen energiatihydestä ja sen määrästä. Maissin kuiva-ainesadon bruttoenergiapitoisuus voi olla jopa yli 450 GJ/ha vuodessa. Lignoselluloosapohjaisista raaka-aineista maissin kuiva-aineen bioenergiantuotantopotentiaali on eräs suurimmista (Taulukko 3). Se soveltuu hyvin etanolin raaka-aineeksi. Yhden hehtaarin alalta voidaan saada valmistettua jopa 7 000–8 000 litraa etanolia vuodessa (Godin ym. 2013a ja b). Maissin kuiva-aine soveltuu hyvin myös biokaasun tuotantoon. Yhden hehtaarin alalta voidaan tuottaa jopa yli 8 700 m³ metaania vuodessa. Hamppu voi tuottaa runsaasti kuiva-ainetta, jonka sisältämä bruttoenergiamäärä voi olla sama kuin maissin bruttoenergiamäärä. Hampun etanolintuotantopotentiaali on suhteellisen hyvä kun taas sen metaanintuotantopotentiaali on heikompi verrattuna useisiin muihin bioenergiakasveihin (Taulukko 3).

Taulukko 3. Maissin, hampun, pajun, vilja oljen ja ruokohelpin kuiva-ainesatosato ja eri bioenergiamuotojen saavutetut määrät.

Kasvi tai sen osa	Kuiva-ainesato t/ha/v	Bruttoenergiasähtö MJ/kg KA	Metaani Nm ³ /kg KA	Etanoli l/kg KA	Lähde
Maissi	9,00–25,00	16,00–18,80	0,35	0,45	Pakarinen ym. 2011, Godin ym. 2013a, Gissen ym. 2014, Samarappuli ym. 2014
Hamppu	14,00–25,00	16,98–19,10	0,22–0,28	0,35	Struik ym. 2000, Komlajeva ym. 2012, Godin ym. 2013b Finnan & Styles 2013
Paju	4,50–27,50	20,00		0,38–0,39	Adegbidi 2001, McKendry 2002, Zamora ym. 2014
Oiki	2,00	17,30	0,29	0,26–0,31	McKendry 2002, Kim & Dale 2003, Lehtomäki ym. 2008
Ruoko-helppi	3,00–10,00	17,90	0,33–0,42		Lehtomäki ym. 2008, Casler 2015, Lord 2015

3.3.3 Kuiva-aineen laadullinen koostumus ja sen vaikutus sadon käytettävyyteen bioenergiantuotannossa

Hampun ja maissin kuiva-aineen kemiallinen koostumus riippuu osittain kasvuston iästä. Kasvuston ikääntyessä soluseinämät paksuuntuvat ja puutuvat, lehtien osuus kuiva-aineesta laskee lehtien kuihtumisen ja putoamisen seurauksena ja varsiosien massa lisääntyy (Godin ym. 2013a). Mitä myöhemmäksi kasvimassan korjaaminen jätetään, sitä enemmän se sisältää ligniiniä ja rakenteellisia sokereita, kuten selluloosaa ja hemiselluloosaa. Myös sadon kuiva-ainepitoisuus ja energiatiheys nousevat (Prade ym. 2011, Godin ym. 2013a ja b). Lisäksi myöhäinen korjuuajankohta laskee useiden mineraal yhdisteiden ja proteiinien pitoisuutta (Godin ym. 2013a, Serrano ym. 2014, Samarappuli ym. 2014). Esimerkiksi syyskuussa korjatun hampun kuiva-ainepitoisuus voi olla 34 %, mutta maaliskuussa jopa 82 % kasvuston kuivumisen seurauksena (Godin ym. 2013b). Talvella korjattu sato soveltuu laadultaan parhaiten poltettavaksi energiaksi vähäisen vesi- ja mineraalipitoisuutensa vuoksi (Godin ym. 2013b). Biokaasun ja etanolin tuotantoon tarkoitettuna kasvimassan paras korjuuajankohta on syys-lokakuussa, jolloin etanolintuotannon kannalta tärkeät liukoiset sokerit ja biokaasuntuotannon kannalta tärkeä N on vielä sitoutuneena kasvimassaan (Prade ym. 2011).

Maissin kuiva-aine sisältää vähän molekyyli-rakenteeltaan monimutkaista ja usein etanolin ja biokaasun tuotantoon käyttökelpotonta ligniiniä (Taulukko 4). Selluloosaa ja hemiselluloosaa on maissin kuiva-ainemassassa suunnilleen saman verran. Hampun kuiva-aine sisältää runsaasti ranteellisia sokereita, joista selluloosan osuus on merkittävin (Taulukko 4). Koska hiilihydraatit ovat rakenteellisiin osiin sidottuja, niiden käyttökelpoisuus etanolin ja biokaasun valmistamisessa käytettävien bakteerien ravintona on rajallista (Pakarinen ym. 2011). Hampun kuiva-aineen sisältämien sokereiden liukoisuutta pystytään lisäämään hienontamalla kasvimassa pienemmiksi partikkeleiksi, jolloin etanolin ja biokaasun valmistusprosessien tehokkuus voi nousta 21 % (Pakarinen ym. 2011). Hampun kuiva-aine saattaa sisältää yhtä paljon helppoliukoista hemiselluloosaa kuin ligniiniäkin. Hampun yksi- ja kaksikotisten lajikkeiden kemiallisessa koostumuksessa on jonkin verran eroja, esimerkiksi kaksikotisten lajikkeiden ligniini-, Cl- ja tuhkapitoisuus voi olla jonkin verran korkeampi kuin yksikotisilla lajikkeilla (Alaru ym. 2011).

Taulukko 4. Maissin, hampun, pajun, vehnän oljen ja ruokohelpin selluloosan, hemiselluloosan ja ligniinin prosentuaalinen osuus kuiva-ainemassasta.

Kasvi tai sen osa	Selluloosa-%	Hemiselluloosa-%	Ligniini-%	Lähde
Maissi	17–19	14	3	Pakarinen ym. 2011, Godin ym. 2013a
Hamppu	32	13	8–17	Pakarinen ym. 2011, Godin ym. 2013a
Paju	49	14	20	Bridgeman ym. 2008, Zamora ym. 2014
Olki (vehnä)	33–41	20–30	8–20	McKendry 2002, Bridgeman ym. 2008
Ruokohelppi	42	30	8–22	Bridgeman ym. 2008

Hampun ja kuiva-ainemassan sisältämät N-, Cl- ja S-pitoisuudet ylittävät suositellut raja-arvot (N 0,6 %, S 0,2 % ja Cl 0,1 %) ja ne muodostavat paljon tuhkaa (Taulukko 5). Tämän seurauksena polttotekniikan on oltava soveltuva runsaan alkuainepitoisuuden aiheuttamien ongelmien hallitsemiseksi (Oberberger ym. 2006). Toisaalta biokaasuntuotannon kannalta runsas alkuainepitoisuus on edullista, kunhan se on N:n ja P:n osalta sopivassa suhteessa hiiliyhdisteiden määrään (Speece 1983, Boontian 2013).

Taulukko 5. Bioenergiakasvien tai niiden osien alkuaine- ja tuhkapitoisuus.

Kasvi tai sen osa	N	P	Si	S	Cl	Na	Tuhka %-KA	Lähde	Alkuaine- ja tuhkapitoisuus	
									Alkuainepitoisuus g/kg ka	Alkuainepitoisuus mg/kg ka
Maissi	16,9	2,0	1,3	0,9	3,3	129	3,3	Pakarinen ym. 2011, Godin ym. 2013b, Serrano ym. 2014		
Hamppu	11,6	1,5	0,4	1,1	1,7	213	2,3–7,6	Alaru ym.2011, Nilsson ym. 2011, Pakarinen ym. 2011, Komlajeva ym. 2012		
Paju	5,0	0,8		0,5	0,3		2,0	McKendry 2002, Oberberger ym. 2006		
Oiki	5,0	1,0	10,0	1,0	4,0	500	5,0	McKendry 2002, Oberberger ym. 2006		
Ruukohelpi	16,8	2,5		2,4	3,9	100	8,8	Casler ym. 2015		

4 TUTKIMUKSEN TARKOITUS

Tutkimuksen tarkoituksena oli arvioida hampun ja maissin soveltuvuutta peltobioenergia-kasveiksi kuiva-aineen laadullisten ja määrällisten ominaisuuksien kautta. Työn tarkoituksena oli lisäksi arvioida lajien soveltuvuutta Suomeen sekä hampun ja maissin eri lajikkeiden välisiä eroja.

Tutkimushypoteesit olivat:

1. Hampun ja maissin lajikkeiden välillä on eroja sadonmuodostuksessa, ravinteidenotossa ja kuiva-aineen kemiallisessa koostumuksessa.
2. Hamppu ja maissi soveltuvat viljeltäviksi Suomessa peltobioenergian tuotantoon.

5 AINEISTO JA MENETELMÄT

5.1 Kokeen toteutus

5.1.1 Koejärjestely

Kenttäkokeet toteutettiin Helsingin yliopiston Viikin opetus- ja tutkimustilalla (60° 13' 38"N, 25° 10' 00"E, 3 m mpy.) vuosina 2007 ja 2008. Vuonna 2007 kenttäkoe oli lohkolla, jonka maalajina oli runsasmultainen hietasavi ja pH 5,9 ja vuonna 2008 lohkolla, jonka maalaji oli runsasmultainen hietamoreeni ja pH 6,4. Vuonna 2007 lohkon kalsium- (Ca) (2 400 mg/l), P- (14 mg/l), Cu- (32 mg/l), sinkki- (Zn) (18,5 mg/l) ja S-pitoisuus (31,6 mg/l) olivat hyviä. K-pitoisuus (170 mg/l) oli välttävä, magnesiumpitoisuus (Mg) (240 mg/l) oli tyydyttävä ja mangaanipitoisuus (Mn) (8,3 mg/l) oli välttävä. Vuonna 2008 lohkon Ca- (2 700 mg/l) ja S-pitoisuus (23,5 mg/l) olivat hyviä, P- (10 mg/l), K- (280 mg/l) Mg- (280 mg/l) ja Zn-pitoisuus (5,92 mg/l) olivat tyydyttäviä ja Mn-pitoisuus (3 mg/l) oli huono.

Kenttäkokeet toteutettiin satunnaistettujen lohkojen kokeena neljällä kerranteella. Maissin ruutukoko oli 20 m² (rivipituus 5,0 m, riviväli 0,7 m ja siementenvälinen etäisyys 0,3 m). Hampun ruutukoko oli 15 m² (6,0 m x 2,5 m) ja kylvötiheys 60 kasvia/m².

5.1.2 Kasvimateriaali

Vuonna 2007 viljeltiin kolmea hamppulajiketta: Chamaeleon (kaksikotinen), Finola (kaksikotinen) ja USO 31 (yksikotinen), sekä kahta maissilajiketta: Gavot ja Campesino. Vuonna 2008 viljeltiin kahta hamppulajiketta: Finola ja USO 31, sekä kolmea maissilajiketta: Ronaldino, KXA7251 ja KXA7211. Maissi kylvettiin 28.5.2007 ja 28.5.2008. Ennen kylvöä ruudut lannoitettiin. Maissin lannoitus oli seuraava: vuonna 2007 N-P-K:120-12-72 kg/ha (Yara Pellon Y4 N-P-K:20-2-12) ja vuonna 2008 N-P-K:210-23-38 kg/ha (CemAgro N-P-K:28-3-5). Hamppu kylvettiin 13.6.2007 ja 28.5.2008. Ruudut lannoitettiin ennen kylvöä. Hampun lannoitus oli seuraava: vuonna 2007 N-P-K:60-6-36 (Yara Pellon Y4 N-P-K:20-2-12) ja vuonna 2008 N-P-K:60-6-36 (Yara Pellon Y4 N-P-K:20-2-12).

5.2 Näytteiden keräys ja käsittely

Kasvustonnäytteet kerättiin yhden neliömetrin alalta seuraavasti: maissi 23.9.2007, 10.10.2008 ja hamppu 24.9.2007 ja 7.10.2008. Kasvit katkaistiin maan rajasta ja paloitettiin. Näytteet kuivattiin +70–80 °C:ssa kolmen vuorokauden ajan ja punnittiin. Kuivatut näytteet silputtiin oksasilppurilla (Garden Pro Line K290, Klippo, Saksa) ja silpusta otettiin osanäyte. Osanäyte jauhettiin 0,5 mm seulan läpi (Retsc ZM 200, Retsch GmbH, Haan, Saksa) ja säilytettiin huoneenlämmössä.

5.2.1 Kemialliset analyysit ja käytetyt laskukaavat

Osanäytteestä määritettiin alkuainepitoisuudet (K, P, S, Si, Na) (Seleiman ym. 2013). Työssä käytetyt astiat happopestiin typpihapolla (HNO_3) yön yli ja huuhdeltiin 5–7 kertaa MQ-vedellä ja ilmakeivattiin. Märkäpoltossa käytetyt teflonputket pestiin mikroaaltouunissa pesuohjelmalla lisäämällä putkiin 6 ml HNO_3 :a ja 1 ml vetyperoksidia (H_2O_2) ja huuhtelemalla putket 5–7 kertaa MQ-vedellä. Näytettä punnittiin 300 mg happopestyihin PTFE teflonputkiin (CEM, Matthews, North Carolina, USA). Jokaiseen putkeen lisättiin 6 ml typpihappoa (67–69 %, VWR International BVBA, Geldenaaksebaan, Leuven, Belgia) ja 1 ml vetyperoksidia (30 %, Merck KGaA, Darmstadt, Saksa) ja laitettiin mikroaaltouuniin (MARSXpress, MARS 240/50, CEM, Matthews, NC, USA) näytteen sisältämien alkuaineiden liukoistamiseksi. Märkäpolton jälkeen näytettä suodatettiin (Whatman paperisuodatin, numero 42, huokoskoko 2,5 μm , GE Healthcare Companies, UK) ja täytettiin 50 ml:ksi tislattulla vedellä. Suodatettu näyte säilytettiin yön yli -20 °C:ssa ja analysoitiin seuraavana päivänä plasmaemissiospektrometrillä (Inductively Coupled Plasma-Optical Spectrometre, iCAP 6200, Thermo Fisher Scientific, Cambridge, UK).

Klooripitoisuus (Cl) analysoitiin kasvinäytteistä kloridometrillä (Corning M926, Corning Ltd., Halstead, Essex, UK) (Mäkelä ym. 2003). Osanäytettä punnittiin 0,1 g ja se uutettiin 10 ml tislattua vettä. Näytettä inkuboitiin 60–70 °C kolmen tunnin ajan sekoittaen tunnin välein. Näytteen annettiin jäähtyä huoneenlämmössä. Tämän jälkeen näyte ravisteltiin huolellisesti ja siitä otettiin osanäyte analyysiin. N- ja C-pitoisuus analysoitiin kasvinäytteistä Dumasin menetelmää käyttäen (Vario MAX CN, Elementar Analysysteme GmbH, Hanau, Saksa) kuten Seleiman ym. (2013).

Tuhkapitoisuuden määrittämistä varten osanäytettä punnittiin astiaan 1,0 g ja kuivattiin yön yli lämpökaapissa (Memmert UN750, Memmert GmbH, Schwabach, Saksa) 105 °C:ssa.

Tämän jälkeen näyte punnittiin (W1) ja siirrettiin muhveliuuniin (Nabertherm LV 15/11/P320, Nabertherm GmbH, Bremen, Saksa) 600 °C:een 18 tunnin ajaksi. Näytteiden annettiin jäähtyä eksikkaattorissa minkä jälkeen ne punnittiin uudelleen (W2). Tuhkan prosentuaalinen osuus kuiva-aineesta laskettiin seuraavalla kaavalla:

$$Tuhka (\%) = \frac{W_2}{W_1} * 100$$

Bruttoenergiapitoisuus (MJ/kg ka) määritettiin noin 0,5 g näytteestä adiabaattisella kalorimetrillä (Parr 1241EA, Parr Instrument Co., Moline, IL, USA) kuten Seleiman ym. (2013). Standardeina käytettiin bentsoehappo pellettejä (1,0 g, Parr Instrument Co., Moline, IL, USA). Näytteet puristettiin pelleteiksi (Pellet Press, Parr Instrument Co., Moline, IL, USA), punnittiin ja poltettiin täydellisesti (O₂ 3,04 MPa) kalorimetrissä. Bruttoenergiataso laskettiin seuraavalla kaavalla:

$$Bruttoenergiataso \left(\frac{GJ}{ha} \right) = \frac{Bruttoenergiapitoisuus \frac{MJ}{kg \text{ ka}} * Biomassataso \frac{kg \text{ ka}}{ha}}{1000}$$

N-, P-, ja K-otto laskettiin kasvimassasta määritettyjen pitoisuuksien perusteella seuraavasti:

$$Ravinne \frac{kg}{ha} = \frac{Biomassataso \frac{kg \text{ ka}}{ha} * Ravinne \frac{g}{kg \text{ ka}}}{1000}$$

Hiili/typpi- ja hiili/fosforisuhteet laskettiin seuraavasti:

$$C/N \text{ tai } C/P = \frac{C \text{ kg ka/ha}}{N \text{ tai } P \text{ kg ka/ha}}$$

5.2.2 Liukoisten sokerien pitoisuus

Liukoiset sokerit, mono- ja oligosakkaridit, määritettiin Trevelyan & Harrison (1952) ja Bailey (1958) anthrone-rikkihappo menetelmää mukaillen. Menetelmä perustuu siihen, että rikkihappo katalysoi pentoosisokereiden dehydraation furfuraaliksi ja heksoosisokereiden dehydraation hydroksimetyyli furfuraaliksi, jotka reagoivat anthrone väriaineen kanssa muodostaen sinivihertävän yhdisteen, jonka pitoisuus voidaan mitata spektrofotometrillä 630nm aallonpituudella. Anthrone-reagenssi valmistettiin lisäämällä 0,2 g Antronia (C₁₄H₁₀O 97 %, Merck KGaA, Darmstadt, Saksa) 0,1 l:aan rikkihappoa 72 % vv (H₂SO₄ 95–97 %, Merck

KGaA, Darmstadt, Saksa). Osanäytettä punnittiin 0,03 Erlenmyer-pulloon. Näytteeseen lisättiin 30 ml 77 % vv etanolia. Näytettä inkuboitiin 80 °C vesihautteessa (SW 22, Julabo GmbH, Seelbach, Saksa) tunnin ajan, minkä jälkeen näyte suodatettiin (Whatman paperisuodatin, numero 1, huokoskoko 11 µm, GE Healthcare Co., UK). Suodatettua näytettä otettiin 250 µl 2 ml Eppendorf-putkeen ja lisättiin 1,25 ml Antroni-reagenssia. Putket suljettiin ja korkkeihin tehtiin neulalla muutamia reikiä paineen kertymisen estämiseksi. Näytettä keitettiin 10 minuuttia vesihautteessa ja jäähdytettiin jäissä. Jäähdytystä näytteestä mitattiin absorbanssi (630 nm) spektrofotometrillä (UV-1800, Shimadzu Corporation, Kioto, Japani). Standardina käytettiin glukoosia (C₆H₁₂O₆, Merck KGaA, Darmstadt, Saksa). Sokeripitoisuus (mg/kg) laskettiin sijoittamalla tulos standardisuoran perusteella saatuun yhtälöön, ottaen huomioon laimennokset ja näytteen paino.

5.3 Säätila kasvukausien 2007 ja 2008 aikana

Säätilatiedot perustuvat Helsingin Kaisaniemen sääasemalta (60°10' N, 24°56' E) kerättyyn aineistoon (Taulukko 6). Vuonna 2007 terminen kasvukausi alkoi 11.4. ja päättyi 9.10. (Ilmatieteenlaitos 2015a). Tehoisan lämpösumman kertymä oli 1563 °C. Vuonna 2008 terminen kasvukausi alkoi 21.4. ja päättyi 31.10. (Ilmatieteenlaitos 2015b). Tehoisan lämpösumman kertymä oli 1512 °C.

Taulukko 6. Vuosien 2007 ja 2008 kasvukausien kuukausittaiset keskilämpötilat ja sademäärät sekä pitkänajan (1981–2010) keskiarvot (Ilmatieteenlaitos 2015c).

Kuukausi	2007		2008		1981–2010	
	Keskilämpötila °C	Sademäärä mm	Keskilämpötila °C	Sademäärä mm	Keskilämpötila °C	Sademäärä mm
Huhtikuu	5,5	33,9	6,1	42,2	3,8	31,7
Toukokuu	10,5	68,3	10,6	8,6	10,0	37,2
Kesäkuu	15,6	42,2	14,4	85,3	14,5	57,3
Heinäkuu	17,5	55,5	17,6	15,6	17,7	62,8
Elokuu	17,6	95,2	15,5	93,9	16,2	80,0
Syyskuu	11,9	87,1	10,4	70,8	11,5	56,5
Lokakuu	7,3	48,4	9,3	134,5	6,6	75,9

5.4 Tilastolliset analyysit

Kerätty aineisto analysoitiin IBM SPSS-ohjelmistolla (IBM SPSS Statistics 22, IBM Corporation, Armonk, NY, USA). Tilastollisena menetelmänä käytettiin varianssianalyysiä luottamusväillä 95 %. Varianssianalyysissä vertailtiin saman lajin eri lajikkeita toisiinsa ja vuosien välisiä eroja niiden lajikkeiden kohdalla, jotka olivat mukana molempina vuosina. Varianssianalyysillä löydetyt tilastollisesti merkitsevät erot ($p \leq 0,05$) analysoitiin Tukeyn testillä.

6 TULOKSET

6.1 Hamppulajikkeiden ominaisuudet

6.1.1 N-, P-, K-otto

N-, P- ja K-otto erosi merkitsevästi hamppulajikkeiden välillä. Chamaeleon otti eniten N:ä ja K:a ja USO 31:n P:a (Taulukko 7). Vuonna 2007 Chamaeleonin N-otto oli noin 50 % suurempi kuin USO 31:n ja yli 450 % suurempi kuin Finolan. Chamaeleonin K-otto oli noin 48 % suurempi kuin USO 31:n ja 470 % suurempi kuin Finolan. USO 31:n P-otto oli 44 % suurempi kuin muiden lajikkeiden. USO 31:n ja Finolan ravinteidenotossa oli eroja vuosien 2007 ja 2008 välillä. USO 31:n N-otto oli 60 % ja K-otto 230 % suurempi vuonna 2007 verrattuna vuoden 2008 tuloksiin. Vuonna 2007 Finolan N-otto oli 39 % ja P-otto 87 % suurempaa verrattuna vuoden 2008 tuloksiin.

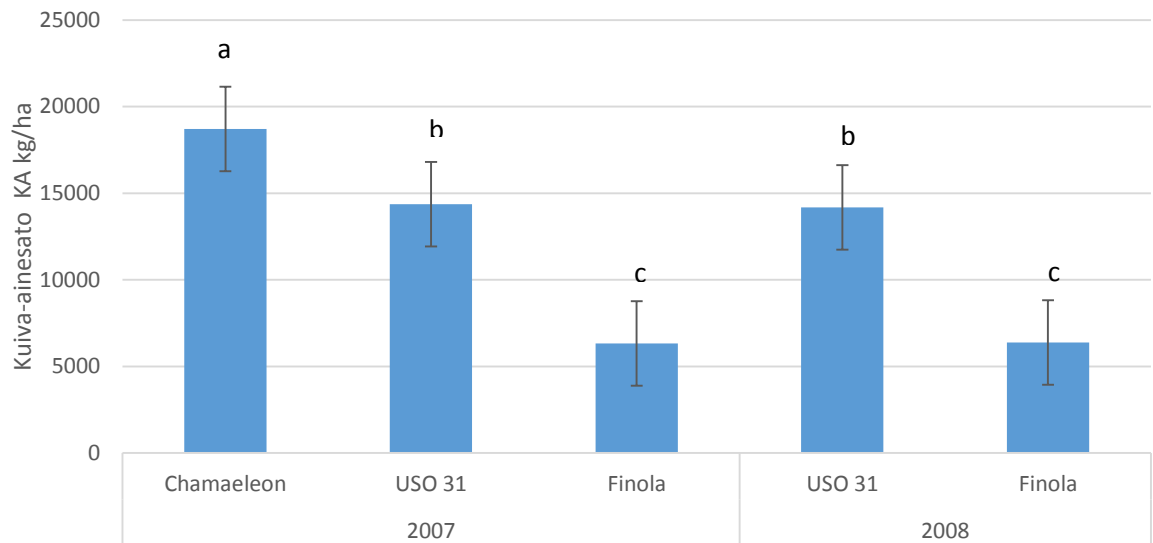
Taulukko 7. Kenttäkokeessa tutkittujen hamppulajikkeiden N-, P- ja K-otto vuosina 2007 ja 2008. Samalla kirjaimella merkityt keskiarvot eivät eroa toisistaan merkitsevästi ($p < 0,05$).

Vuosi	Lajike	N kg/ha	P kg/ha	K kg/ha
2007	Chamaeleon	451,08 a	28,17 b	235,11 a
	USO 31	240,68 b	50,50 a	50,44 c
	Finola	100,92 c	27,98 b	159,16 b
	S.E.M. (df 11)	44,82	3,56	23,64
	Keskiarvo	264,23	35,55	148,24
	S.E.M (df 2)	101,75	7,48	53,59
2008	USO 31	99,33 c	13,40 c	70,03 c
	Finola	61,22 d	3,64 d	177,02 b
	S.E.M. (df 11)	10,45	2,20	22,20
	Keskiarvo	80,28	8,52	123,53
	S.E.M (df 1)	15,56	3,98	43,68

Standard error of the means (S.E.M.) = keskiarvojen keskivirhe. Degrees of freedom (df) = vapasteet. n=4.

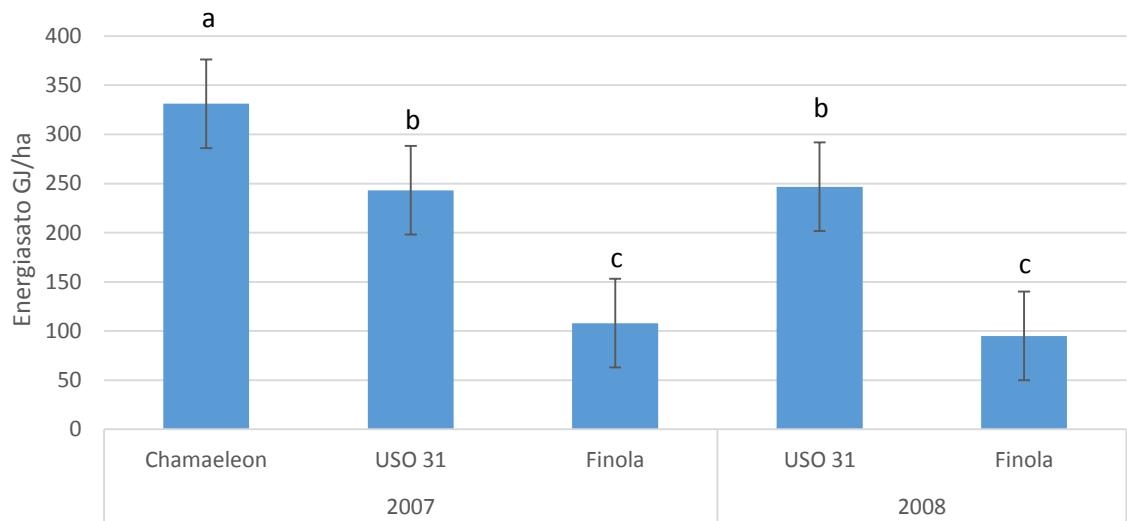
6.1.2 Satoisuus

Hampun kuiva-ainesato vaihteli lajikkeiden välillä. Chamaeleon tuotti eniten kuiva-ainesatoa, 18,7 t/ha (Kuva 4), mikä oli 23 % enemmän kuin USO 31 ja 67 % enemmän kuin Finola vuonna 2007. USO 31 tuotti 14,4 t/ha, mikä oli 56 % enemmän kuin Finola, 6,3 t/ha. USO 31:n ja Finolan kuiva-ainesadot olivat samat 2007 ja 2008.



Kuva 4. Kenttäkokeessa tutkittujen hamppulajikkeiden kuiva-ainesato ja keskiarvon keski-
virhettä kuvaava jana vuosina 2007 ja 2008. Samalla kirjaimella merkityt keskiarvot eivät
eroa toisistaan merkitsevästi ($p < 0,05$). $n=4$.

Chamaeleonin energiasato oli runsain (Kuva 5), 331 GJ/ha. Se oli 27 % suurempi kuin seuraavaksi satoisimman USO 31:n ja yli 300 % suurempi kuin Finolan. USO 31 tuotti 243 GJ/ha, mikä oli 56 % enemmän kuin Finola, 108 GJ/ha. USO 31:n ja Finolan energiasadot olivat samat 2007 ja 2008.



Kuva 5. Kenttäkokeessa tutkittujen hampullajikkeiden energiasadot ja keskiarvon keskivirhettä kuvaava jana vuosina 2007 ja 2008. Samalla kirjaimella merkityt keskiarvot eivät eroa toisistaan merkitsevästi ($p < 0,05$). $n=4$.

6.1.3 Kuiva-aineen laadulliset ominaisuudet

Hampun kuiva-aineen laatu vaihteli merkitsevästi lajikkeiden välillä (Taulukko 8). Chamaeleonin kuiva-aineen N-pitoisuus oli yli 32 % suurempi verrattuna muihin vuonna 2007 viljeltyihin lajikkeisiin. Finolan P-pitoisuus oli 21 % korkeampi verrattuna USO 31:n ja 66 % korkeampi Chamaeleonin P-pitoisuuksiin verrattuna. Finolan kuiva-aineen Si-pitoisuus oli yli 630 % pienempi muihin lajikkeisiin verrattuna. S-pitoisuus oli pienin Chamaeleonin kuiva-aineessa ja ero muihin lajikkeisiin oli yli 39 %. Na-pitoisuus oli lähes sama lajikkeesta riippumatta. Tuhkapitoisuus oli suurin Chamaeleonin kuiva-aineessa, ero muihin lajikkeisiin oli yli 26 %. USO 31:n liukoisten sokerien pitoisuus oli suurin ollen lähes 200 %:a Chamaeleonin ja yli 370 %:a korkeampi Finolan kuiva-aineeseen verrattuna. Kuiva-aineen energiatiheys oli kaikilla lajikkeilla sama.

USO 31:n ja Finolan kuiva-aineen alkuaine- ja tuhkapitoisuudet olivat korkeammat vuonna 2007 verrattuna vuoteen 2008. Alkuainepitoisuuksissa ei ollut eroja vuonna 2008 USO 31:n ja Finolan välillä. USO 31:n kuiva-aineen N-pitoisuus oli 57 % korkeampi vuonna 2007 verrattuna vuoteen 2008 ja Finolan noin 43 %:ia. USO 31:n P-pitoisuus oli vuonna 2007 yli 370

:%a korkeampi verrattuna seuraavaan vuoteen ja Finolan kohdalla ero oli yli 670 %:a. Samankaltaisia huomattavia eroja oli myös muiden alkuainepitoisuuksien kohdalla, ainoastaan kuiva-aineen energiatiheys oli tasainen eri vuosien välillä. Finolan liukoisten sokereiden pitoisuus oli yli kolme kertaa suurempi vuonna 2008 kuin 2007.

Taulukko 6. Kenttäkokeessa tutkittujen hampullajikkeiden kuiva-aineen N-, P-, Si-, S-, Cl-, Na-, liukoisten sokereiden- ja tuhkan pitoisuus sekä energiatheys vuosina 2007 ja 2008. Samalla kirjaimella merkityt keskiarvot eivät eroa toisistaan merkitsevästi (p<0,05).

Vuosi	Lajike	N	P	Alkuaineptoisuus g/kg KA					mg/kg KA			Liukoiset soke- rit g/kg KA	Energiatheys MJ/kg KA
				Si	S	Cl	Na	Tuhka %	Na	Tuhka %	Liukoiset soke- rit g/kg KA		
2007	Chamaeleon	24,2 a	1,51 c	1,702 a	1,45 a	-	67,91 bc	9,57 a	30,30 ab	17,70 a			
	USO 31	16,6 b	3,52 b	1,705 a	2,55 b	-	77,87 b	7,12 b	57,79 a	16,92 b			
	Finola	16,3 b	4,40 a	0,271 b	2,35 b	-	50,14 bd	6,58 b	15,38 b	17,08 b			
	S.E.M. (df 11)	13,2	0,38	0,213	0,16	-	5,03	0,44	7,43	0,11			
	Keskiarvo	19,01	3,14	1,226	2,11	-	65,31	7,75	17,24				
	S.E.M. (df 2)	2,57	0,86	0,477	0,34	-	8,11	0,92	0,24				
2008	USO 31	7,1 c	0,94 d	0,158 c	1,09 c	1,63 a	178,71 a	3,39 c	47,17 a	17,20 b			
	Finola	9,4 c	0,65 d	0,155 c	0,68 c	1,91 a	199,33 a	4,51 c	50,92 a	17,13 b			
	S.E.M. (df 11)	0,7	0,09	0,001	0,12	0,01	0,19	0,56	2,83	0,06			
	Keskiarvo	8,3	0,79	0,156	0,88	1,77	189,02	3,95	49,04	17,17			
	S.E.M. (df 1)	0,01	0,14	0,001	0,20	0,14	10,31	0,56	1,88	0,03			

Standard error of the means (S.E.M.) = keskiarvojen keskiarvo. Degrees of freedom (df) = vapausasteet. n=4

Chamaeleonin C/N oli lajikkeista pienin ja C/P suurin vuonna 2007 (Taulukko 9). Kahden muun lajikkeen tulokset olivat vuonna 2007 samat, mutta seuraavana vuonna C/N ja C/P suhteet olivat aiempaa vuotta huomattavasti suuremmat.

Taulukko 7. Kenttäkokeessa tutkittujen hamppulajikkeiden kuiva-aineen C/N- ja C/P-suhteet vuosina 2007 ja 2008.

Vuosi	Lajike	C/N	C/P
2007	Chamaeleon	18	284
	USO 31	26	119
	Finola	27	97
	S.E.M. (df 11)	1,7	75,2
	Keskiarvo	24	167
	S.E.M (df 2)	2,8	59,0
2008	USO 31	61	382
	Finola	48	673
	S.E.M. (df 11)	4,2	23,8
	Keskiarvo	55	528
	S.E.M. (df 1)	5,3	118,8

Standard error of the means (S.E.M.) = keskiarvojen keskivirhe. Degrees of freedom (df) = vapausasteet. n=4

6.2 Maissilajikkeiden ominaisuudet

6.2.1 N-, P-, K-otto

Maissin lajikkeiden N-, P-, ja K-otossa ei ollut eroja vuonna 2007. Vuonna 2008 eroja esiintyi ainoastaan K-otossa (Taulukko 10). KXA7251:n K-otto oli yli 57 % runsaampaa muihin lajikkeisiin verrattuna. Vuonna 2007 maissilajikkeet ottivat enemmän K:a ja P:a kuin vuonna 2008. N-otossa ei ollut eroja lajikkeiden tai vuosien välillä.

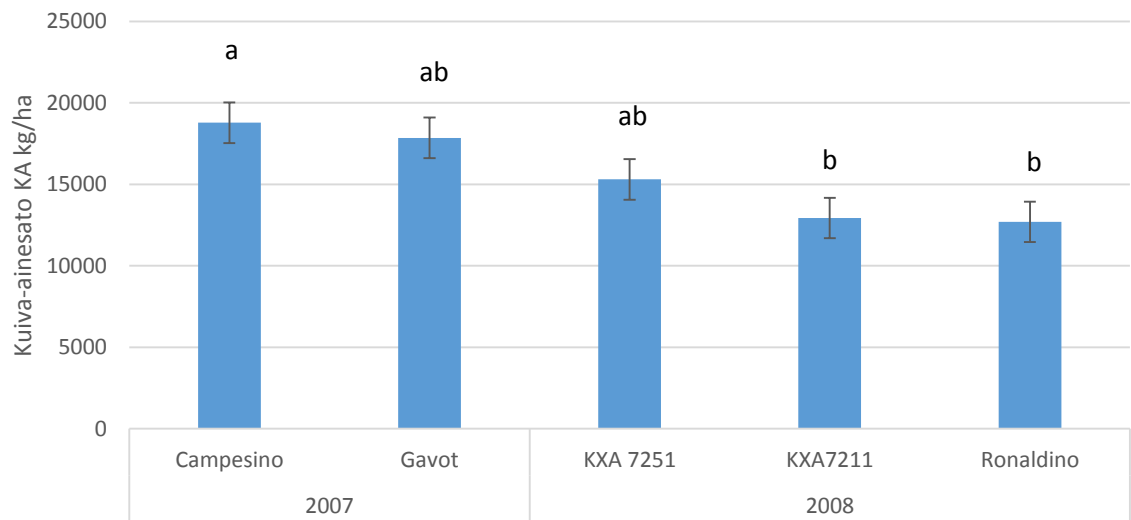
Taulukko 8. Kenttäkokeessa tutkittujen maissilajikkeiden N-, P- ja K-otto vuosina 2007 ja 2008. Samalla kirjaimella merkityt keskiarvot eivät eroa toisistaan merkitsevästi ($p < 0,05$).

Vuosi	Lajike	N kg/ha	P kg/ha	K kg/ha
2007	Campesino	297,64 a	37,17 a	354,29 a
	Gavot	237,34 a	38,59 a	327,84 a
	S.E.M. (df 7)	21,90	3,10	26,90
	Keskiarvo	267,49	37,88	341,06
	S.E.M. (df 1)	30,15	0,71	13,23
2008	KXA7211	200,37 a	21,40 b	205,62 b
	KXA7251	245,57 a	26,48 b	262,12 c
	Ronaldino	197,46 a	23,50 b	172,20 b
	S.E.M. (df 11)	9,70	1,02	42,60
	Keskiarvo	214,47	23,80	213,13
	S.E.M. (df 2)	15,57	1,47	26,24

Standard error of the means (S.E.M.) = keskiarvojen keskivirhe. Degrees of freedom (df) = vapasteet. $n=4$.

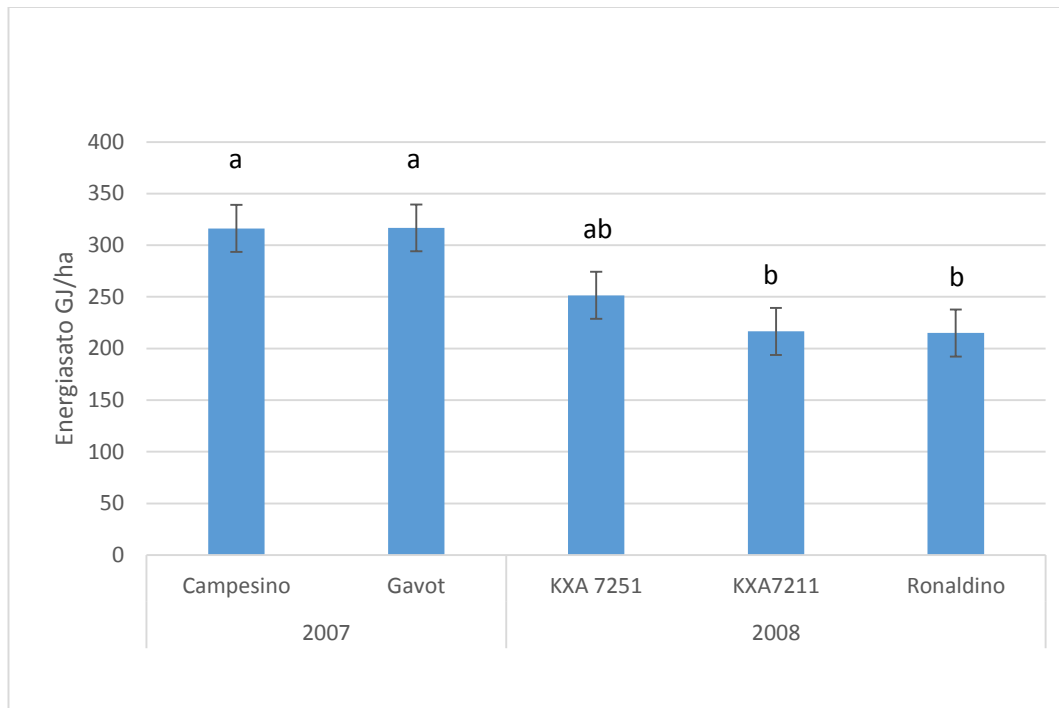
6.2.2 Satoisuus

Maissilajikkeiden kuiva-ainesadoissa ei ollut eroja vuonna 2007. Vuoden 2007 lajikkeet olivat 30 %:a satoisampia, 18,8–17,9 t/ha, kuin vuonna 2008 viljellyt KXA7211 ja Ronaldino, 12,9–12,7 t/ha. KXA7251 oli verrannollinen satoisuudessa, 15,3 t/ha, kaikkiin muihin lajikkeisiin (Kuva 6).



Kuva 6. Kenttäkokeessa tutkittujen maissilajikkeiden kuiva-ainesato ja keskiarvon keskivirhettä kuvaava jana vuosina 2007 ja 2008. Samalla kirjaimella merkityt keskiarvot eivät eroa toisistaan merkitsevästi ($p < 0,05$). $n=4$.

Maissin energiasadoissa ei ollut eroja vuonna 2007 viljeltyjen lajikkeiden kesken, eikä vuoden 2008 lajikkeiden kesken. Campesino ja Gavot tuottivat yli 30 % enemmän energiaa, 316 GJ/ha, kuin vuonna 2008 viljeltyt KXA7211 ja Ronaldino, 215 GJ/ha. KXA7251:n energiasato, 251 GJ/ha, oli sama kaikkien muiden lajikkeiden kanssa (Kuva 7).



Kuva 7. Kenttäkokeessa tutkittujen maissilajikkeiden energiasato ja keskiarvon keskivirhettä kuvaavat janat vuosina 2007 ja 2008. Samalla kirjaimella merkityt keskiarvot eivät eroa toisistaan merkitsevästi ($p < 0,05$). $n=4$.

6.2.3 Kuiva-aineen laadulliset ominaisuudet

Maissin kuiva-aineen laadullisissa ominaisuuksissa oli havaittavissa jonkin verran lajikkeiden välisiä eroja (Taulukko 11). Vuoden 2007 lajikkeiden P- ja Na-pitoisuudet olivat samat. S-pitoisuus oli noin 14 % suurempi Gavotin kuiva-aineessa muihin lajikkeisiin verrattuna. Na-pitoisuus oli 70 % alhaisempi vuoden 2007 lajikkeilla vuoden 2008 lajikkeisiin verrattuna. KXA7251:n Cl-pitoisuus oli yli 25 % korkeampi muihin lajikkeisiin verrattuna. Liukoisten sokereiden pitoisuuksissa tai kuiva-aineiden energiatiheyksissä ei ollut eroja lajikkeiden tai vuosien välillä. Tuhka-, N- ja P-pitoisuudet olivat lähes samat lajikkeiden ja vuosien välillä.

Taulukko 9. Kenttäkokeessa tutkittujen maissilajikkeiden kuiva-aineen N-, P-, Si-, S-, Cl-, Na-, liukoisten sokereiden- ja tuhkan pitoisuus sekä energiatiheys vuosina 2007 ja 2008. Samalla kirjaimella merkityt keskiarvot eivät eroa toisistaan merkitsevästi (p<0,05).

Vuosi	Lajike	Alkuainepitoisuus g/kg KA							mg/kg KA		
		N	P	Si	S	Cl	Na	Tuhka %	Liukoiset sokerit g/kg KA	Energiatiheys MJ/kg KA	
2007	Campesino	15,79 a	2,00 a	1,47 b	0,96 b	-	31,7 b	5,29 b	200,87 a	16,80 a	
	Gavot	13,31 b	2,14 a	1,74 a	1,12 a	-	37,8 b	5,76 b	187,18 a	16,87 a	
	S.E.M. (df 7)	0,55	0,11	0,09	0,03	-	1,38	0,21	5,21	0,04	
	Keskiarvo	14,55	2,07	1,61	1,04	-	34,8	5,5	194,03	16,84	
	S.E.M. (df 1)	1,24	0,07	0,14	0,07	-	3,02	0,23	6,84	0,03	
2008	KXA7211	15,44 a	1,69 a	1,37 c	0,91 b	2,94 b	121,3 a	6,28 a	215,05 a	16,72 a	
	KXA7251	16,08 a	1,74 a	1,57 a	0,92 b	3,80 a	144,4 a	5,86 b	215,85 a	16,35 a	
	Ronaldino	15,55 a	1,85 a	1,52 c	0,91 b	3,02 b	136,0 a	5,72 b	177,14 a	16,94 a	
	S.E.M.(df 11)	0,19	0,07	0,02	0,13	0,13	22,34	0,09	7,59	0,18	
	Keskiarvo	15,69	1,76	1,49	0,91	3,25	133,9	5,95	202,68	16,67	
	S.E.M (df 2)	0,20	0,05	0,05	0,002	0,27	6,78	0,17	12,76	0,17	

Standard error of the means (S.E.M.) = keskiarvojen keskiarvo. Degrees of freedom (df) = vapausasteet. n=4

C/N- ja C/P-suhteet olivat lähes samat lajikkeiden ja eri vuosien välillä (Taulukko 12). Vuoden 2008 lajikkeiden C/P-suhteet olivat hieman korkeammat vuoden 2007 lajikkeisiin verrattuna.

Taulukko 10. Kenttäkokeessa tutkittujen maissilajikkeiden kuiva-aineen C/N- ja C/P-suhteet vuosina 2007 ja 2008.

Vuosi	Lajike	C/N	C/P
2007	Campesino	27	218
	Gavot	33	211
	S.E.M. (df 7)	1,3	11,6
	Keskiarvo	30	215
	S.E.M. (df 1)	3	3,5
2008	KXA7211	27	262
	KXA7251	27	251
	Ronaldino	27	230
	S.E.M. (df 11)	0,3	26,4
	Keskiarvo	27	248
	S.E.M. (df 2)	0	9,4

Standard error of the means (S.E.M.) = keskiarvojen keskivirhe. Degrees of freedom (df) = vapausasteet. n=4

7 TULOSTEN TARKASTELU

7.1 Hampun kuiva-aineessa on potentiaalia energiantuotannon raaka-aineeksi

Chamaeleon osoittautui hampullajikkeista satoisimmaksi ja USO 31 oli tulosten perusteella sadontuottokyvyltään toinen. Suomalaisen Finola-lajikkeen sadontuottokyky jäi kokeessa heikoimmaksi. Finola on jalostettu öljyhampullajikkeeksi, jossa päämääränä on ollut kehittää pitkänpäivän ja lyhyen kasvukauden olosuhteissa runsaasti öljypitoisia siemeniä tuotava lajike. Kuiva-aineen tuottokyky on ollut Finolan jalostuksessa toissijainen ominaisuus (Järvenranta & Virkajärvi 2002). Aikaisemmin (Cosentino ym 2013, Sankari & Mela 1998) on havaittu lyhyen kasvuajan hampullajikkeiden tuottavan vähemmän kuiva-ainetta kuin pitkän kasvuajan lajikkeiden. Finolan kaltaisen lyhyen kasvuajan hampun sadontuottokyky oli ennako-odotusten mukaisesti muita lajikkeita alhaisempi. Tässä kokeessa hamppu ei tuottanut muualla Euroopassa saavutettuja huippusatoja, 25 KA t/ha (Struik ym. 2000), mutta saadut tulokset olivat verrannollisia keskimääräisiin saavutettuihin satoihin (Godin ym. 2013 b Finnan & Styles 2013) Finolaa lukuunottamatta. Koska kuiva-aineen suuri tuottokyky on tärkein yksittäinen ominaisuus bioenergiakasvia valittaessa (Byrt ym. 2011, Prade ym. 2011, McKendry 2002, Godin ym. 2013a ja b, Davis ym. 2013), hampullajikkeen valinnalla on suuri merkitys sadontuottokyvyn kannalta. Hampujen tuottama bruttoenergiasato hehtaaria kohden vastasi 2 675–8 275 l polttoöljyä lajikkeesta riippuen, kun hampun bruttoenergiasato suhteutettiin polttoöljyn energiatiheyteen, jonka Alakangas (2000) on havainnut olevan 40 MJ/kg.

Hampun lajikkeiden välillä oli merkitsevä ero alkuainepitoisuuksissa yksittäisten alkuaineiden osalta, mutta yhdenkään lajikkeen kuiva-aineen alkuainepitoisuus ei osoittautunut kokonaisuutta tarkastellessa erityisen niukaksi tai runsaaksi. Polttoprosesseja haittaavien alkuaineiden suositellut enimmäispitoisuudet (N 0,6 %, S 0,2 % ja Cl 0,1 % Obernberger ym. 2006) ylittyivät kaikkien lajikkeiden osalta yksittäisiä arvoja lukuunottamatta. Hampun satoisimman lajikkeen, Chamaeleonin kuiva-aineen alkuainekoostumus oli polttoprosesseja ajatellen paras, vaikka ei läheskään suositusten (Obernberger ym. 2006) mukainen. N-pitoisuus oli Chamaeleonin kuiva-aineessa korkein, mutta muiden alkuaineiden pitoisuuksien osalta se sijoittui kokeessa keskivaiheille tai esimerkiksi S-pitoisuuden osalta pienimmäksi. N muuttuu poltettaessa pääasiassa haitattomaan kaasumaiseen muotoon (Obernberger

ym. 2006), mistä johtuen polttamisen kannalta haitallisista alkuaineista N aiheuttaa pienimmät ongelmat (Oberberger ym. 2006).

Vuonna 2007 hamppulajikkeissa alkuainepitoisuus oli korkeampi kuin aikaisemmissa tutkimuksissa (Alaru ym.2011, Nilsson ym. 2011, Pakarinen ym. 2011, Komlajeva ym. 2012). Vuoden 2008 alkuainepitoisuus oli sama tai hieman alhaisempi aikaisempien tutkimusten tuloksiin verrattuna (Alaru ym.2011, Nilsson ym. 2011, Pakarinen ym. 2011, Komlajeva ym. 2012), vaikka viljelyssä olleet kaksi lajiketta olivat samat kuin vuonna 2007. Alkuainepitoisuuksien vuosien välisiin eroihin vaikuttivat todennäköisesti eri kylvö- ja korjuuajankohdat sekä kasvukausien sääolot. Hamppu kylvettiin noin kaksi viikkoa myöhemmin ja korjattiin noin kaksi viikkoa aikaisemmin vuonna 2007 kuin vuonna 2008. Lisäksi eri peltolohkojen erilaiset lannoitushistoriat ja maaperän koostumus ovat voineet vaikuttaa kasvien ravinteiden ottoon ja tätä kautta kuiva-aineen alkuainepitoisuuksiin.

Hampussa oli niukasti liukoisia sokereita, kuten Pakarinen ym. (2011) ja Godin ym. (2013a) ovat havainneet aikaisemmin. Hampun kuiva-aineen sisältämät sokerit ovat pääasiassa sitoutuneina rakenteellisiin osiin (Pakarinen ym. 2011, Godin ym. 2013a). Lajikkeiden joukosta erottui USO 31, jonka liukoisten sokereiden pitoisuus oli huomattavasti korkeampi muihin lajikkeisiin verrattuna. Korkeimman sokeripitoisuutensa takia USO 31:n kuiva-aine oli sopivinta etanolintuotantoon ja lisäksi se oli lajikkeena kohtuullisen satoisa. Godinin ym. (2013a) mukaan teoreettinen etanolinsaanto hampun kuiva-aineesta on noin 270 l/t KA otettaessa huomioon liukoisten ja hydrolyysin avulla saatujen, käymiseen soveltuvien sokereiden määrän. Tämän perusteella laskettuna tutkittujen hamppulajikkeiden kuiva-aineesta voidaan tuottamaan noin 1 700–5 050 l/ha etanolia lajikkeesta riippuen. Energiatiheyksissä ei ollut eroja lajikkeiden välillä ja ne vastasivat muualla Euroopassa saatuja arvoja (Prade ym 2011, Komlajeva ym. 2012). Lajikkeiden C/N- ja C/P-suhteet erosivat toisistaan vaikkakin, C/N suhde oli lähellä suositusarvoa (15–20) ja C/P-suhde oli suositusarvoa (<75) korkeampi (Speece & McCarty 1964, Boontian 2013). Runsaan P-pitoisuuden vuoksi kuiva-ainetta voi joutua laimentamaan, jonka seurauksena C/N-suhde laskee suosituksen alle ja N on lisättävä prosessiin (Speece 1983). Lietelanta voi soveltua ravinesuhteiden korjaamiseen nestemäisen olomuotonsa ja N-pitoisuutensa ansiosta (Saidu ym. 2014). Finolan C/N- ja C/P-suhteet olivat lähimpänä suositusarvoja, joten sen kuiva-aine sellaisenaan oli laadultaan biokaasuntuotannon kannalta sopivinta raaka-ainetta vuonna 2007. Pakarisen ym. (2011) mukaan hampun teoreettinen metaanisaanto on noin 220 Nm³/t KA, jonka perusteella laskettuna tutkittujen hamppulajikkeiden kuiva-aineesta voidaan valmistaa 1 390–4 110 Nm³/ha metaania lajikkeesta riippuen.

Runsas ravinteidenotto ei välttämättä ilmene kuiva-aineen runsaana alkuainepitoisuutena tai heikkona ravinteidenkäyttötehokkuutena. Chamaelonin N ja K otto oli runsainta ja jopa moninkertaista muihin lajikkeisiin verrattuna. Aktiivinen ravinteidenotto ilmeni Chamaeleonin kuiva-aineen sisältämien alkuaineiden korkeana pitoisuutena vain N:n osalta, johdun lajikkeen satoisuudesta. Chamaeleonin P:n käytön tehokkuus oli lajikkeista parhain. USO 31:n P-otto oli lajikkeista aktiivisinta, mutta kuiva-aineen P-pitoisuus oli ainoastaan toiseksi korkein. Pienimmästä ravinteidenotosta huolimatta Finolan kuiva-aineen P-pitoisuus oli korkein vuonna 2007 ja sen P:n käyttötehokkuus oli huonoin. Hampulle annettu N-P-K-lannoitus alitti lajikkeiden ottamien N:n, P:n ja K:n määrän vuonna 2007. Niukasta N-P-K-lannoituksesta suhteessa otettuihin ravinteisiin voidaan päätellä, että hamppu pystyy hyödyntämään myös maaperän N-, P-, K-varoja. Toisaalta kasvin ravinnetarpeita vastaava lannoitus estää maaperän köyhtymisen.

Kokonaisuutta tarkasteltaessa hamppu voi olla lupaava peltobioenergiakasvi Suomeen. Hamppu pystyy tuottamaan saman verran kuiva-ainesatoa Suomessa kuin muualla Euroopassa (Struik ym. 2000, Komlajeva ym. 2012). Vaatimaton lannoitus ja kasvinsuojelu (Desanlis ym. 2013) tekevät hampusta houkuttelevan vaihtoehdon viljelykasviksi. Yksivuotisenä kasvina hampulla ei ole energiantuotantoon käytettävien monivuotisten heinäkaskvien, kuten ruokohelven (*Phalaris arundinacea* L.), suomaa eroosiota hillitsevää vaikutusta peltoviljelyssä (Davis ym. 2013).

7.2 Maissilajikkeet olivat satoisia ja bioenergialadultaan hyviä

Tutkituista viidestä maissilajikkeesta erottui kolme satoisaa lajiketta, joiden laadulliset ominaisuudet olivat hyvin samanlaiset. Vuonna 2007 viljelyssä olleet Gavot ja Campesino tuottivat kuiva-ainesatoa saman verran. Vuonna 2008 viljelty KXA7251:n tuotti kuiva-ainesatoa yhtä paljon kuin kaikki muut lajikkeet. Kahden niukimmin kuiva-ainetta muodostaneen lajikkeen, KXA7211:n ja Ronaldinon, kuiva-ainesadoissa ei ollut eroja, mutta ero satoisimpiin lajikkeisiin oli alle 20 %:a. Maissin kaikki lajikkeet tuottivat vähintään yhtä paljon kuiva-ainesatoa, kuin esimerkiksi Ruotsissa (Godin ym. 2013a ja b, Gissen ym. 2014). Maissin tuottama bruttoenergiasato hehtaaria kohden vastasi 5 400–7 900 l polttoöljyä lajikkeesta riippuen, kun maissin bruttoenergiasato suhteutetaan polttoöljyn energiatiheyteen, jonka Alakangas (2000) on havainnut olevan 40 MJ/kg. Lämpimän ilmaston C₄-kasvina maissi ei ole Suomessa optimaalisissa kasvuolosuhteissa etenkin alkukesästä. Maissin viljelyyn ai-

heuttaa suurta epävarmuutta Suomen kylmä kevät ja mahdollinen halla, jotka voivat vahingoittaa taimia lämpötilan laskiessa alle 5 C° (Miedema 1982) ja vähentää yhteyttämistä (Vapaavuori & Aro 1990). Maissilla ei ole hyvää perinnöllistä kykyä sopeutua viileisiin oloihin (<+10 C°), joka osittain johtuu C₄-fotosynteesimuodosta ja kasvin alkuperästä (Long 1983, Miedema 1982). Maissi kykenee sopeutumaan viileisiin oloihin vain vähän ja sillä on huono karaistumiskyky (Long 1983). Tämän perusteella voidaan päätellä, että riittävän myöhäinen kylvö varmistaa maissin viljelyn onnistumisen. Lisäksi voidaan päätellä, ettei maissi kykene täysin hyödyntämään korkeaa satopotentiaaliaan Suomessa. Kylvön myöhentäminen vähentää kasvukauden aikana käytettävissä olevaa kokonaislämpösummaa ja siten lyhentää kasvuaikaa. Maissi kasvaa parhaiten yli + 10 C° lämpötilassa, joten vaikka kasvustoa ei korjattaisi ennen varsinaisen termisen kasvukauden päättymistä, sen kasvu hidastuu merkittävästi kun lämpötila laskee alle + 10 C° (Long 1983, Miedema 1982). Suomessa maissin viljely on tasapainoilua toisaalta alkuvaiheen riittävän korkean lämpötilan ja toisaalta mahdollisimman pitkän kasvukauden välillä runsaan sadon saavuttamiseksi. Maissi ei yleensä ehdi tuleentua Suomessa (Reitsma ym. 2009), mutta se kykenee tästä huolimatta tuottamaan huomattavan määrän kuiva-ainesatoa, jonka bioenergialaatu on korkea etenkin etanolintuotantoon.

Maissilajikkeiden alkuainepitoisuus oli sama ja pääsääntöisesti korkea, kuten aiemmin on havaittu (Pakarinen ym. 2011, Godin ym. 2013b, Serrano ym. 2014). Yhteistä lajikkeille oli, että kaikkien polttoprosessin kannalta haitallisten alkuaineiden pitoisuudet ylittivät suositusyläraajat (N 0,6 %, S 0,2 % ja Cl 0,1 % Obernberger ym. 2006) S:ä lukuunottamatta jopa moninkertaisesti ja tuhkan määrä oli korkea. Tutkitut maissilajikkeet ovat olleet kertyneen lämpösunnan perusteella suvullisessa vaiheessa (Reitsma ym. 2009), jolloin kasvit ovat pääsääntöisesti ottaneet elinkaarensa aikana käytettävät ravinteet, eikä niitä ole ehtinyt vielä huuhtoutua pois. Kuiva-aineen alkuainepitoisuus riippuu osittain korjuuajankohdasta, joten tämän ja aikaisempien tutkimusten (Godin ym. 2013a, Serrano ym. 2014, Samarappuli ym. 2014) perusteella polttoprosessien raaka-aineeksi ohjattavien erien sopiva korjuuaika on talvella tai seuraavana keväänä, jotta haitallisten alkuaineiden pitoisuus laskisi alle suosituspitoisuuksien ylärajan.

Tutkittujen maissilajikkeiden liukoisten sokereiden pitoisuus oli korkea, mistä johtuen ne kaikki soveltuvat erinomaisesti etanolintuotannon raaka-aineeksi. Godinin ym. (2013a) mukaan teoreettinen etanolinsaanto maissin kuiva-aineesta on noin 450 l/t KA otettaessa huomioon käymisprosessiin soveltuvien sokereiden määrän, kuten hampun tapauksessa. Tämän perusteella laskettuna kokeen maissilajikkeiden kuiva-aineesta voidaan valmistaa noin

5 800–8 450 l etanolia hehtaarilta, mikä vastaa aiempia havaintoja (Godin 2013a ja b). Maissia pidetään peltobioenergiakasveista lupaavimpana vaihtoehtona etanolintuotannon raaka-aineeksi (Lee 1997, Byrt ym. 2011, Pakarinen ym. 2011). Korjuuajankohta oli optimaalinen etanolituotantoon ohjattavalle maissibiomassalle. C/N-suhde oli lähes sama lajikkeiden välillä ja erittäin lähellä suositeltua (15–20 Speece & McCarty 1964) biokaasuntuotannon tasoa. C/P-suhde oli noin kolminkertainen suositeltuun enimmäispitoisuuteen nähden (<75 Speece & McCarty 1964, Srivastava 1981). Biokaasuntuotannon kannalta maissin kuiva-aine sisältää huomattavan runsaasti P:a suhteessa hajotettaviin hiiliyhdisteisiin. Koska tarpeellisten ravinteiden liian korkea pitoisuus voivat olla myrkyllisiä metanogeenisille bakteereille (Speece 1983), on mahdollista, että kuiva-ainetta joudutaan laimentamaan, kuten hampun tapauksessa. Pakarisen ym. (2011) mukaan teoreettinen metaanin saanto on maissin kuiva-aineesta noin 350 Nm³/t KA. Tämän perusteella kokeen maissilajikkeiden kuiva-aineesta voidaan valmistaa 4 500–6 500 Nm³ metaania hehtaaria kohden lajikkeesta riippuen.

Maissi lajikkeiden N-otto oli sama lajikkeesta tai vuodesta riippumatta, mistä johtuen satoisimmat lajikkeet hyödynsivät N:n tehokkaimmin. Satoisimmat lajikkeet, Campesino ja Gavot, ottivat P:a ja K:a yhtä paljon ja merkittävästi enemmän kuin muut lajikkeet. KXA7251 oli yhtä satoisa kuin Campesino ja Gavot, mutta se hyödynsi ottamansa P:n ja K:n tehokkaimmin. Kahden vähiten kuiva-ainetta tuottaneen lajikkeen Ronaldinon ja KXA7211:n ravinteidenotto oli P:n ja K:n osalta pienin. Vuonna 2007 maissille annettu N-P-K-lannoitus alitti otettujen ravinteiden määrän. Tästä voidaan päätellä, että maissi kykenee hyödyntämään myös maaperän N-, P- ja K-varoja. Vuoden 2008 kuiva-ainesatoa rajoittavana tekijänä ei ollut lannoitteena annettu N, K tai P, koska lannoitteena annettiin enemmän ravinteita kuin maissit ottivat. Vuoden 2008 kevät oli kylmempi, kuin edellisenä vuonna, minkä johdosta maissin alkukehitys on voinut olla hitaampaa, koska ne kylvettiin samana päivänä molempina vuosina.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Hamppu ja maissi menestyvät Suomessa ja tuottavat saman verran kuiva-ainetta kuin muuallakin Euroopassa. Vaikka hamppu ja maissi eivät varsinaisesti ole sopeutuneet Suomen kasvukauteen, esimerkiksi keskilämpötila jää alle näiden kasvien optimin ja pitkä päivä estää useimpien hamppulajikkeiden kukinnan virittäytymisen, sillä ei ole merkitystä bioenergiantuotannon kannalta.

Hamppu ja maissi eivät täytä kaikkia hyville bioenergiakasveille asetettuja kriteerejä. Korkean alkuainepitoisuuden vuoksi polttotarkoituksiin tuotettavaa kuiva-ainetta ei kannata korjata syksyllä. Hamppu ja maissi soveltuvat yhtä hyvin poltettavaksi. Chamaeleon oli hamppulajikkeista paras polton raaka-aineeksi koska se oli yhtä satoisa kuin satoisimmat maissilajikkeet ja sen alkuainepitoisuus oli samanlainen kuin maissilla. Huonoin vaihtoehto oli Finola-lajike, jonka alkuainepitoisuus oli korkea ja kuiva-ainesato niukka. Maissilajikkeiden laatuominaisuudet olivat samankaltaiset, joten maissin tapauksessa lajike ei vaikuttanut soveltuvuuteen polton raaka-aineeksi.

Maissi oli kahdesta lajista selkeästi parempi vaihtoehto etanolin tuotannon raaka-aineeksi korkean liukoisten sokereiden pitoisuudesta johtuen. Hampun ja maissin C/P-suhteet olivat epätasapainoiset biokaasuntuotannon kannalta, mistä johtuen raaka-ainetta voidaan joutua laimentamaan, jotta liiallinen P ei aiheuta ongelmia prosessia ylläpitävillä mikrobeille. Tästä johtuen lähellä optimia olevia C/N-suhteita ei voida täysipainoisesti hyödyntää tuotantoprosessissa. Hyvä ratkaisu C/P-suhteiden korjaamiseksi voisi olla kuiva-aineen sekoittaminen nestemäisen N-pitoisen aineen kanssa, kuten lietelannan. Hamppu ja maissi voivat olla yhtä hyviä vaihtoehtoja biokaasun tuotannon raaka-aineeksi, mikäli tuloksissa tarkastellaan vain satoisinta hamppulajiketta, Chamaeleonia. Parhaimman soveltuvuuden ratkaisee satoisuus, sillä biokaasun tuotannon kannalta oleelliset C/N- ja C/P-suhteet olivat hampulla ja maissilla epäedulliset. Maissi on tutkituista kahdesta lajista parempi vaihtoehto minkä tahansa bioenergiantuotannon raaka-aineeksi, koska kaikki tutkimuksessa mukana olleet lajikkeet tuottivat runsaasti kuiva-ainetta ja laatuerot olivat pieniä. Toisaalta hyvä hamppulajike, kuten Chamaeleon, tuottaa liukoisten sokereiden pitoisuutta lukuunottamatta vähintään yhtä paljon ja laadukasta kuiva-ainetta vain puolella lannoitemäärällä maissiin verrattuna.

9 KIITOKSET

Kiitos perheelleni, työn ohjaajille ja ystäville kärsivällisyydestä, tuesta ja neuvoista prosessin ajalta. FT Arja Santanen ja professori Pirjo Mäkelä ansaitsevat suuren kiitoksen ajastaan ja vaivastaan työni ohjauksen parissa. Erityinen kiitos emeritus professori Richard E. Speecelle lähdeaineiston johdosta.

10 LÄHTEET

- Adegbidi, H. G., Volk, T. A., White, E. H., Abrahamson, L. P., Briggs, R. D. & Bickelhaupt, D. H. 2001. Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State. *Biomass & Bioenergy* 20: 399–411.
- Alakangas, E. 2000. Suomessa Käytettävien Polttoaineiden Ominaisuuksia. Espoo: VTT Tiedotteita 2045. 189 s.
- Alakangas, E. & Flyktman, M. 2001. Biomass CHP technologies. Jyväskylä: VTT Energy Reports. 62 s.
- Alaru, M., Kukku, L., Olt, J., Menind, A., Lauk, R., Vollmer, E. & Astover, A. 2011. Lignin content and briquette quality of different fibre hemp plant types and energy sunflower. *Field Crops Research* 124: 332–339.
- Amaducci, S., Colauzzi, M., Bellocchi, G., Cosentino, S.L., Pahkala, K., Stomphf, T.J., Westerhuis, W., Zatta, A. & Venturi, G. 2012. Evaluation of a phenological model for strategic decisions for hemp (*Cannabis Sativa* L.) biomass production across European sites. *Industrial Crops and Products* 37: 100–110.
- Amaducci, S., Zatta, A., Raffanini, M. & Venturi, G. 2008. Characterisation of hemp (*Cannabis sativa* L.) roots under different growing conditions. *Plant & Soil* 313: 227–235.
- Bailey, R. W. 1958. The reaction of pentoses with Anthrone. *Biochemical Journal* 68: 669–672.
- Beck, D.L., Clay, D.E. & Reitsma K.D. 2009. Tillage, crop rotations, and cover crops. Teoksessa: Clay, D.E., Reitsma, K.D. & Clay, S.A. (toim.) Best Management Practices

- for Corn Production in South Dakota. Brookings: South Dakota State University. Ss. 21–30.
- Bentsen, N. S. & Felby, C. 2012. Biomass for energy in the European Union – a review of bioenergy resource assessments. *Biotechnology for Biofuels* 5: 1–10.
- Boontian, N. 2013. Optimization of the anaerobic digestion of biomass: a review. *Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics* 43: 48–54.
- Bridgeman, T.G., Jones, J.M., Shield, I. & Williams, P.T. 2008. Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. *Fuel* 87: 844–856.
- Byrt, C. S., Grof, C. P.L. & Furbank, R. T. 2011. C₄ plants as biofuel feedstocks: Optimising biomass production and feedstock quality from a lignocellulosic perspective. *Journal of Integrative Plant Biology* 53: 120–135.
- Casler, M.D., Jerome, H., Chernerey, E., Brummer, C. & Dien, B.S. 2015. Designing selection criteria for use of reed canarygrass as a bioenergy feedstock. *Crop Science* 55: 1–8.
- Catangui, M.A., Fuller, B.W. & French, B.W. 2009. Corn insect pests. Teoksessa: Clay, D.E., Reitsma, K.D. & Clay, S.A. (toim.) *Best Management Practices for Corn Production in South Dakota*. Brookings: South Dakota State University. Ss. 49–58.
- Clay, D.E & Moechnig M.J. 2009. Weeds and herbicide injury in corn. Teoksessa: Clay, D.E., Reitsma, K.D. & Clay, S.A. (toim.) *Best Management Practices for Corn Production in South Dakota*. Brookings: South Dakota State University. Ss. 71–92.

- Clay, D.E. & Reitsma, K.D. 2009. Soil fertility. Teoksessa: Clay, D.E., Reitsma, K.D. & Clay, S.A. (toim.) Best Management Practices for Corn Production in South Dakota. Brookings: South Dakota State University. Ss. 39–48.
- Cosentino, S. L., Riggi, E., Testa, G., Scordia, D. & Copani, V. 2013. Evaluation of European developed fibre hemp genotypes (*Cannabis sativa* L.) in semi-arid Mediterranean environment. *Industrial Crops and Products* 50: 312–324.
- Davis, S. C., Boddey, R. M., Alves, B. J. R., Cowie, A. L., George, B. H., Ogle, S. M., Smith, P., Noordwijk, M. & Wijk, M. T. 2013. Management swing potential for bioenergy crops. *GCB Bioenergy* 5: 623–638.
- Desanlis, F., Cerruti, N. & Warner, P. 2013. Hemp agronomics and cultivation. Teoksessa: Bouloc, P. (toim.) Hemp: Industrial Productions and Uses. Oxfordshire: CABI. Ss. 98–124.
- Draper, M.A., Langham, M.A., Clay, S.A. & Ruden, B.E. 2009. Corn diseases in South Dakota. Teoksessa: Clay, D.E., Reitsma, K.D. & Clay, S.A. (toim.) Best Management Practices for Corn Production in South Dakota. Brookings: South Dakota State University. Ss. 59–70.
- Euroopan yhteisöjen komissio. 2009. Komission asetus (EY) n:o 1122/2009. Viitattu 10.8.2015. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:316:0065:0112:FI:PDF>
- European Commission. 2008. En agri/2008/...item 4 (DS/2008/21) draft Commission regulation (EC) no.../..of amending regulations (EC) no 795/2004, (EC) no 796/2004 and (EC) no 1973/2004, as regards the hemp varieties eligible for direct payments under Council regulation (EC) no 1782/2003. Viitattu 23.7.2015. http://www.finola.fi/EU_Proposal_220908.pdf

- European Commission. 2012. Agriculture and rural development DG: EU agriculture – Statistical and economic information – 2012. Viitattu: 20.2.2015. http://ec.europa.eu/agriculture/statistics/agricultural/2012/pdf/d01-1-41_en.pdf
- European Parliament. 2009. Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources amending and subsequently repealing directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. Viitattu: 29.11.2014. <http://register.consilium.europa.eu/doc/srv?l=EN&f=ST%203736%202008%20INIT>
- Farnham, D. 2001. Corn Planting Guide. Iowa State University. Verkkojulkaisu. Viitattu 9.2.2015. www.extension.iastate.edu/Publications/PM1885.pdf
- Finnan, J. & Styles, D. 2013. Hemp: a more sustainable annual energy crop for climate and energy policy. *Energy Policy* 58: 152–162.
- Gissen, C., Prade, T., Kreuger, E., Nges, I. A., Rosenqvist, H., Svensson, S. E., Lantz, M., Mattsson, J. E., Borjesson, P. & Bjornsson, L. 2014. Comparing energy crops for biogas production - yields, energy input and costs in cultivation using digestate and mineral fertilisation. *Biomass & Bioenergy* 64: 199–210.
- Godin, B., Lamaudiere, S., Agneessens, R., Schmit, T., Goffart, J. P., Stilmant, D., Gerin, P. A. & Delcarte, J. 2013a. Chemical characteristics and biofuel potential of several vegetal biomasses grown under a wide range of environmental conditions. *Industrial Crops and Products* 13: 3216–3224.
- Godin, B., Lamaudiere, S., Agneessens, R., Schmit, T., Goffart, J. P., Stilmant, D., Gerin, P. A. & Delcarte, J. 2013b. Chemical characteristics and biofuels potentials of various plant biomasses: influence of the harvesting date. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 93: 3216–3224.

- Granö, U–P. 2011. Bioenergiaraaka-aineiden Jalostus. HihghBio – Interreg Pohjoinen 2008–2011. Jyväskylän yliopisto. Verkkojulkaisu. Viitattu: 24.6.2015.
https://ciweb.chydenius.fi/project_files/HighBio%20projekti%20INFO/INFO%20High-Bio%20F04.pdf
- Hall, R.G., Reitsma, K.D. & Clay, D.E. 2009. Corn planting guide. Teoksessa: Clay, D.E., Reitsma, K.D. & Clay, S.A. (toim.) Best Management Practices for Corn Production in South Dakota. Brookings: South Dakota State University. Ss. 13–16.
- Hazell, P. & Pachauri, R. 2006. Bioenergy and Agriculture: Promises and Challenges. Washington, DC: IFRI. 28 s.
- Howell, T. A. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy Journal* 93: 281–289.
- Ilmatieteenlaitos. 2015a. Terminen kasvukausi 2007. Viitattu 5.2.2015. <http://ilmatieteenlaitos.fi/kasvukausi-2007>
- Ilmatieteenlaitos. 2015b. Terminen kasvukausi 2008. Viitattu 5.2.2015. <http://ilmatieteenlaitos.fi/kasvukausi-2008>
- Ilmatieteenlaitos. 2015c. Lämpötila- ja sadetilastoja vuodesta 1961. Viitattu 27.8.2015.
<http://ilmatieteenlaitos.fi/tilastoja-vuodesta-1961>
- Järvenranta, K. & Virkajärvi, P. 2002. Tutkimustuloksia Finola-siemenhampun (FIN-314) Viljelykokeesta MTT:n Pohjois-Savon tutkimusasemalla. Viitattu 29.8.2015.
<http://www.finola.fi/loppuraportti.pdf>

- Kaur, A., Bedi, S., Gill, G. K. & Kumar, M. 2012. Effect of nitrogen fertilizers on radiation use efficiency, crop growth and yield in some maize (*Zea mays* L.) genotypes. *Maydica* 57: 75–82.
- Kim, S. & Dale, B. E. 2003. Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass & Bioenergy* 26: 361–375.
- Komlajeva, L., Adamovics, A. & Poisa, L. 2012. Comparison of different energy crops for solid fuel production in Latvia. Teoksessa: P. Rivza & S. Rivza (toim.). *Renewable Energy and Energy Efficiency. Proceedings of the International Scientific Conference.* Jelgava: Latvia University of Agriculture. Ss. 45–50.
- Köhler, F. E. 1887. Köhler`s Medizinal-Pflanzen in naturgetreuen Abbildungen und kurz erläuterndem Texte. Band 1. Pabst, G. (toim.) Gera Untermhaus 85 s.
- Köhler, F. E. 1898. Köhler`s Medizinal-Pflanzen in naturgetreuen Abbildungen und kurz erläuterndem Texte. Band 3. Vogtherr, M. & Gürke M. (toim.) Gera Untermhaus 81 s.
- Lehtomäki, A., Viinikainen, T.A. & Rintala J.A. 2008. Screening boreal energy crops and crop residues for methane biofuel production. *Biomass & Bioenergy* 32: 541–550.
- Long, S.P. 1983. C₄ photosynthesis at low temperatures. *Plant, Cell and Environment* 6: 345–363.
- Lord, R.A. 2015. Reed canary grass (*Phalaris arundinacea*) outperforms *Miscanthus* or willow on marginal soils, brownfield and non-agricultural sites for local, sustainable energy crop production. *Biomass & Bioenergy* 78: 110–125.

- Louarn, G., Chenu, K., Fournier, C., Andrieu, B. & Giauffret, C. 2008. Relative contributions of light interception and radiation use efficiency to the reduction of maize productivity under cold temperatures. *Functional Plant Biology* 35: 885–899.
- Mavi. 2014. Erikoistukien Tarkastusohje 2014, Dnro 3487/61/2014. Viitattu 10.8.2015.
<http://www.mavi.fi/fi/oppaat-ja-lomakkeet/viljelijä/Documents/Erikoistukien-tarkastus-ohje-2014.pdf>
- Martin, T. 2011. *Setosphaeria turcica*, Gungal Mating and Plant Defence. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences. 54 s.
- McKendry, P. 2002. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology* 83: 37–46.
- Médiavilla, V., Jonquera, M., Schmid-Slembrouck, I. & Soldati, A. 1998. Decimal code for growth stages of hemp (*Cannabis sativa* L.). *Journal of the International Hemp Association* 2: 68-74.
- Miedema, P. 1982. The effects of low temperature on *Zea mays*. *Advances in Agronomy* 35: 93–124.
- Monson, R. K., Edwards, G. E. & Ku, M. S. B. 1984. C₃-C₄ intermediate photosynthesis in plants. *Bioscience* 34: 563–574.
- Mossberg, B. & Stenberg, L. 2012. Suuri Pohjolan Kasvio. Suomentanut: Vuokko, S. & Väre, H. 3. painos. Helsinki: Tammi. 928 s.
- Mäkelä, P., Munns, R., Colmer, T.D. & Peltonen-Sainio, P. 2003. Growth of tomato and an ABA-deficient mutant (*sitiens*) under saline conditions. *Physiologia Plantarum* 117: 58–63.

- Nilsson, D., Bernesson, S. & Hansson, P. A. 2011. Pellet production from agricultural raw materials – a systems study. *Biomass & Bioenergy* 35: 679–689.
- Obernberger, I., Brunner, T. & Bärtnhaler, G. 2006. Chemical properties of solid biofuels — significance and impact. *Biomass & Bioenergy* 30: 973–982.
- Pakarinen, A., Maijala, P., Stoddard, F. L., Santanen, A., Tuomainen, P., Kymäläinen, M. & Viikari, L. 2011. Evaluation of annual bioenergy crops in the boreal zone for biogas and ethanol production. *Biomass & Bioenergy* 35: 3071-3078.
- Pellerin, S., Mollier, A. & Plénet, D. 2000. Phosphorus deficiency affects the rate of emergence and number of maize adventitious nodal roots. *Agronomy Journal* 92: 690–697.
- Prade, T., Svensson, S. E., Andersson, A. & Mattsson, J. E. 2011. Biomass and energy yield of industrial hemp grown for biogas and solid fuel. *Biomass & Bioenergy* 35: 3040–3049.
- Reitsma, K.D., Clay, S.A. & Hall, R.G. 2009. Corn growth and development. Teoksessa: Clay, D.E., Reitsma, K.D. & Clay, S.A. (toim.) *Best Management Practices for Corn Production in South Dakota*. Brookings: South Dakota State University. Ss. 3–8.
- Saidu, M., Yuzir, A., Salim, M.R., Salmiati, Azman, S. & Abdullah, N. 2014. Biological pre-treated oil palm mesocarp fibre with cattle manure for biogas production by anaerobic digestion during acclimatization phase. *International Biodeterioration & Biodegradation* 95: 189–194.

- Samarappuli, D. P., Johnson, B. L., Kandel, H. & Berti, M. T. 2014. Biomass yield and nitrogen content of annual energy/forage crops preceded by cover crops. *Field Crops Research* 167: 31–39.
- Sankari, H. S. & Mela, T. J. N. 1998. Plant development and stem yield of non-domestic fibre hemp (*Cannabis sativa* L.) cultivars in long-day growth conditions in Finland. *Journal of Agronomy & Crop Science* 181: 153–159.
- Šarauskius, E., Buragiene, S., Masilionyte, L., Romaneckas, K., Avizienyte, D. & Sakalauskas, A. 2014. Energy balance, costs and CO₂ analysis of tillage technologies in maize cultivation. *Energy* 69: 227–235.
- Seleiman, M. F., Santanen, A., Stoddard, F., Jaakkola, S., Hartikainen, H., Ekholm, P. & Mäkelä, P. 2013. Biomass yield and quality of bioenergy crops grown with synthetic and organic fertilizers. *Biomass & Bioenergy* 59: 477–485.
- Serrano, C., Monedero, E., Portero, H., Jimenez, E. & Ordas, B. 2014. Efficient biofuel production from traditional maize under low input. *Agronomy for Sustainable Development* 34: 561–567.
- Singer, J. W., Meek, D. W., Sauer, T. J., Prueger, J. H. & Hatfield, J. L. 2011. Variability of light interception and radiation use efficiency in maize and soybean. *Field Crops Research* 121: 147–152.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach M. & Smith, J. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363: 789–813.

- Speece, R.E. 1983. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. *Environmental Science & Technology* 17: 416–427.
- Speece, R.E. & McCarty, P.L. 1964. Nutrient requirements and biological solids accumulation in anaerobic digestion. *Advances in Water Pollution Research* 2: 305–322.
- Srivastava, V. J., Novil, M., Tarman, P.B. & Chynoweth D.P. 1981. Hybrid biothermal conversion of biomass to methane. *Biogas and Alcohol Fuels Products* 2: 31–59.
- Stewart, D. W., Costa, C., Dwyer, L. M., Smith, D. L., Hamilton, R. I. & Ma, B. L. 2003. Canopy structure, light interception, and photosynthesis in maize. *Agronomy Journal* 95: 1465–1474.
- Struik, P.C., Amaducci, S., Bullard, M.J., Stutterheim, N.C., Venturi, G. & Cromack, H.T.H. 2000. Agronomy of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.) in Europe. *Industrial Crops and Products* 11: 107–118.
- Trevelyan, W. E. & Harrison, J. S. 1952. Studies on yeast metabolism. 1. Fractionation and microdetermination of cell carbohydrates. *Biochemical Journal* 50: 298–303.
- Vapaavuori, E. & Aro, E.-M. 1990. Fotosynteesin biokemia. Teoksessa: Lahti, T. & Smolander, H. (toim.) *Johdatus Metsien Perustutantobiologiaan Silva Carelica*; 16. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy. 271 s.
- van der Werf, H. M. G., Brouwer, K., Wijnhuizen, M. & Withagen, J.C.M. 1995. The effect of temperature on leaf appearance and canopy establishment in fiber hemp (*Cannabis sativa* L.). *Annals of Applied Biology* 126: 551–561.
- Zamora, D. S., Apostol, K. G. & Wyatt, G. J. 2014. Biomass production and potential ethanol yields of shrub willow hybrids and native willow accessions after a single 3-year

harvest cycle on marginal lands in central Minnesota, USA. *Agroforestry Systems* 88: 593–606.