

Tartu Ülikool
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Ökoloogia ja Maateaduste Instituut
Geograafia osakond

Magistritöö keskkonnatehnoloogias ökotehnoloogia suunal

**MIKROVETIKATEST BIOGAASI TOOTMISE
POTENTSIAAL EESTIS**

Birgit Kena

Juhendaja: PhD Kaido Soosaar
Kaasjuhendaja: PhD Antti Roose

Kaitsmisele lubatud
Juhendaja
Osakonna juhataja

Tartu 2015

SISUKORD

SISSEJUHATUS	4
1 ÜLEVAADE VALDKONNAST.....	6
1.1 Mikrovetikad ja nende produktsiooni mõjutavad tegurid	6
1.1.1 Kliima	8
1.1.2 Süsihappegaasi ressursid.....	9
1.1.3 Toitained	11
1.1.4 Veeressursid.....	11
1.1.5 Maakasutus ja asukohavalik	13
1.2 Mikrovetikate kasvatamissüsteemid	14
1.2.1 Avatud ehk lahtised kasvatamissüsteemid.....	16
1.2.2 Suletud ehk kinnised kasvatamissüsteemid	18
1.3 Mikrovetikate eraldamine kasvukeskkonnast	20
1.4 Mikrovetikatest biogaasi tootmine	22
1.4.1 Biogaasi tootmine	23
1.4.2 Mikrovetikate sobivus biogaasi tootmiseks.....	25
1.4.3 Vetikakütuste tootmise majanduslikud aspektid.....	27
2 MATERJAL JA METOODIKA	29
2.1 Eesti valgusrežiimi ja temperatuuri pikaajaline aastane käik.....	29
2.2 Mikrovetikate kasvatamise kuluanalüüs	30
2.3 Mikrovetikate kasvatamine integreeritud süsteemitingimustes	31
3 TULEMUSED JA ARUTELU	33
3.1 Eesti valgusrežiimi ja temperatuuri pikaajaline aastane käik.....	33
3.2 Mikrovetikate kasvatamise kuluanalüüs	37
3.3 Mikrovetikate kasvatamine integreeritud süsteemitingimustes	41

3.3.1	CO ₂ sidumine ja biogaasi tootlikkus.....	43
3.3.2	Reovee puhastamisest tulenev lisandväärtus	47
	KOKKUVÕTE	50
	TÄNUAVALDUSED	52
	KASUTATUD KIRJANDUS	53
	SUMMARY	62
	LISAD.....	65
	Lisa 1. Kuluanalüüsiks kasutatud parameetrid.	65

SISSEJUHATUS

Maailma rahvaarvu juurdekasvuga (Pison, 2013) ja paljude riikide arenguvajadusega seoses suureneb inimkonna energiavajadus (Miranda ja Lima, 2011; Ugursal, 2014; Abas jt, 2015). Seejuures kaasaegne elukorraldus ja energiamajandus tuginevad suuresti veel fossiilsete kütuste kasutamisel, mis põhjustab aga keskkonna saastumist. Ühtlasi on nende taastumatute looduslike energiaressursside varud ka piiratud. Seega energiakriisi vältimine ja globaalseid kliimamuutusi põhjustavate kasvuhooonegaaside emissiooni vähendamine tingivad vajaduse alternatiivsete ja keskkonnasõbralike taastuvenergia ressursside järele.

Üheks taastuvenergiaallikaks on biomassist toodetav bioenergia, kus alternatiivse substraadina on võimalik kasutada ka mikrovetikaid. Potentsiaalse kütuseallikana hakati vetikaid uurima juba 1950ndatel ning 20. sajandil lahvatanud ülemaailmne 1970ndate energiakriis, mil nafta näiline otsasaamine ja kõrge hind tõukas teadlasi otsima alternatiivseid kütuseallikaid, tiivustas seda veelgi. Ehkki kriisi möödumisel nimetatud uurimissuund soikus, siis on vetikatehnoloogia niinimetatud roheliste tehnoloogiate kasutuselevõtu kontekstis taas maailmas väga aktuaalne. (Pudkuiko, 2014; Ward jt, 2014) Ühtlasi on mikrovetikad uue alternatiivse biokütuse toormena pannud aluse kolmanda põlvkonna biokütustele (Dragone jt, 2010; Wang, 2013; Dutta jt, 2014) ning tänu oma kasulikele omadustele laiemalt tähelepanu pälvinud biotehnoloogia valdkonnas.

Ka Eestis, eelkõige ülikoolides, on taas hakatud rohkem huvituma mikrovetikate kasutusvõimalustest keskkonnakoormust leevendavate eesmärkide täitmisel. Seega võib käesolev uurimus Eesti teadus- ja rakenduspraktikat rikastada, juhtides tähelepanu mikrovetikate kasvatamisvõimalusele integreeritud süsteemitingimustes ehk koostöös tööstustootmisega. Kuna mikrovetikate kasvatamine Eesti kliimaatilistest tingimustest tingituna on keerulisem ja kulukam kui seda oleks soojemates maailma piirkondades, siis enim tasub tähelepanu pöörata neile kui lisaväärtusele, mis vähendaksid tööstustootmise kulusid. Seetõttu on eeskätt külma kliima riikides, kuid ka mujal, rohkem tähelepanu pööratud reovee puhastamisvõimalusele mikrovetikatega (Grönlund jt, 2004; Arnold, 2013). Kuna aga enamuse reoveepuhastusjaamades toimub ka reoveesette anaeroobne lagundamine, siis oleks alternatiivne lahendus kooskääritamine mikrovetikatega, mis ühtlasi suurendaks biogaasi tootlikkust (Olsson jt, 2013).

Käesoleva magistritöö laiemaks eesmärgiks on mikrovetikate kui potentsiaalse energiaallika tutvustamisega seotud kompetentsi tekitamine Eesti bioenergeetikas. Konkreetsem eesmärk on aktuaalsete teadustööde, aruannete, kirjanduse ja muude allikate põhjal anda ülevaade fotoautotroofsete mikrovetikate kasvatamise, kogumise ja biogaasiks muundamise tehnoloogiast ning protsesside mõjuteguritest, samuti analüüsida vetikatehnoloogia rakendamise potentsiaali Eestis: mikrovetikatest biogaasi tootmise teostatavuse ja tasuvuse analüüs.

Eesmärgist lähtuvalt otsitakse vastuseid järgmistele uurimisküsimustele:

- Milline on kiiresti areneva vetikatehnoloogia suundumus maailmas?
- Mis on kriitiliselt olulisemad tingimused mikrovetikate kasvatamiseks Eestis?
- Milline on sobivaim mikrovetikate kasvatamistehnoloogia Eesti tingimustes?
- Kas mikrovetikatest biogaasi tootmine saab olla Eestis majanduslikult tasuv?

Käesoleva magistritöö ülesehitus on jagatud kolme suuremasse osasse. Esimeses peatükis antakse kirjandusallikate põhjal ülevaade esmalt mikrovetikate olemusest, produktiivsust mõjutavatest teguritest ning biomassi kasvatamis- ja kogumistehnoloogiast. Edasi keskendutakse mikrovetikatest biogaasi tootmisele, kus esitatakse üldine ülevaade biogaasi tootmisprotsessist ning seejärel kirjeldatakse substraadi sobilikkust vastavasse tehnoloogilisse süsteemi. Lisaks antakse ülevaade vetikatehnoloogia rakendamise majanduslikest aspektidest. Teises peatükis kirjeldatakse teostatavuse ja tasuvuse analüüsi meetodikat, mille abil analüüsitakse mikrovetikatest biogaasi tootmise potentsiaali Eestis ning kolmandas peatükis esitatakse tulemused ja keskendutakse nende analüüsile.

1 ÜLEVAADE VALDKONNAST

Antud peatükis antakse ülevaade mikrovetikate olemusest, kasvutingimustest, kirjeldatakse erinevaid mikrovetikate kasvatamis- ja kogumistehnoloogiaid, tehnoloogilisi protsesse ning substraadi biogaasiks muundamise protsessi. Samuti tuuakse välja, kuidas on võimalik mikrovetikaid kasvatada, kasutades ära olemasolevaid (jääk)ressursse, näiteks reovett, suitsugaase, jääksoojust või juba olemasolevat infrastruktuuri.

1.1 Mikrovetikad ja nende produktsiooni mõjutavad tegurid

Vetikad on väga heterogeenne grupp taimseid organisme, mida leiab erinevates maailma biotoopides: enamik neist elab veekogudes, nii mage-, riim- kui ka merevees, kuid neid leidub ka maapinnas ja õhkkeskkonnas (Fishman jt, 2010; Andersson jt, 2011; Griffiths jt, 2011). Ainevahetustüübi alusel on võimalik vetikaid jagada fotoauto-, hetero-, mikso- ja fotoheterorroofideks (Chen jt, 2011) ning morfoloogia ja suuruse abil mikro- ja makrovetikateks (Griffiths jt, 2011; Heitur, 2014). Käesolevas töös käsitletakse vaid fotoautotroofseid mikrovetikaid kui potentsiaalseid nn roheline energia allikaid ning edaspidi kasutatakse nende nimetamiseks ka üldisemaid termineid nagu „vetikad“ ja „mikrovetikad“ (juhul kui pole märgitud teisiti).

Fotoautotroofsed mikrovetikad on ainuraksed mikroskoopilised fotosünteesivõimelised liigid, kelle suurust mõõdetakse peamiselt mikromeetrites (tavaliselt läbimõõdult 5–50 μm (Zamalloa jt, 2011)). Nad eksisteerivad üksikute rakkudena või ka ahelate, gruppide või kolooniatena (Griffiths jt, 2011), moodustada sedasi hulkrakseid struktuure. Kasutades valgust energiaressursina ja süsihappegaasi (CO_2) süsinikressursina, toodavad nad omale elutegevuseks vajalikku orgaanikat. Orgaaniline aine, mis valmib fotosünteesil, kasutatakse ära uute fotosünteesivate rakkude ülesehitamiseks ehk tulemusena kasvatatakse biomassi (Demirbas ja Fatih Demirbas, 2011), kuid ühtlasi toimub fotosünteesi käigus ka hapniku eraldumine. Maismaataimedega võrreldes, kellel kulub valdav osa fotosünteesil akumulunud energiast mitmesuguste abimehhanismide nagu juurte, varte, lehtede jm kasvatamiseks, siis mikrovetikatel, kes ei vaja mingeid tugelemente, on iga rakk fotosünteesiv organism ning energia kulub vaid reproduktsiooniks (Kukk, 1963).

Vetikate biomassi põhikomponentideks on süsivesikud, valgud ja lipiidid (Griffiths jt, 2011), millede kõrge sisaldus vetikarakkudes on tingitud primitiivsest ehk üherakulisest

ehitusest (Kukk, 1963). Võrreldes maismaataimedega sisaldavad nad tselluloosi ja hemitselluloosi vähe ning ligniini peaaegu üldse mitte (Montingelli jt, 2015), mistõttu suudavad mikroorganismid neid kergemini lagundada. Neis on sageli ka mikrotoitainete, mineraalide ja paljude vitamiinide sisaldus palju suurem kui maismaataimedes. (Lüsi, 2010)

Mikrovetikate kasvatamisel tuleb lähtuda konkreetsete liikide ökoloogilistest nõudmistest. Nende kasvu mõjutavad mitmed keskkonnategurid: abiootilised faktorid nagu valgus (kvaliteet ja hulk), temperatuur, toitainete kontsentratsioon, hapnik (O₂), CO₂, pH, soolsus ja toksilised kemikaalid ning biootilised faktorid nagu patogeenid (bakterid, seened, viirused), zooplankton ja konkurents teiste vetikaliikidega (Larsdotter, 2006; Mata jt, 2010). Ka raskendatud ilmastikuolud (nt rahe, tormid jne), sademed ja aurumine (Darzins jt, 2010) ning tootmisprotsessi tegurid nagu vetikamassi liigutamine segamise abil, lahjendatavuse aste, reaktori sügavus ja saagi sagedus mõjutavad kasvatamist (Mata jt, 2010). Ühtlasi on kõigil nimetatud kasvukeskkonnatingimustel oluline mõju ka mikrovetikate keemilisele koostisele ja tootlikkusele (Petrick jt, 2013). Tingimuste optimaalsed ja talutavad vahemikud on aga liigispetsiifilised ehk sõltuvad vastavalt kasvatatavast vetikaliigist ning võivad varieeruda ka vastavalt sellele, millist lõpp-produkti soovitakse mikrovetikatest toota.

Ideaalsete tingimuste juures (piisavalt toitaineid, valgust jne) kasvavad mikrovetikad väga kiiresti ning nende hulk kahekordistub tavaliselt 24 tunni jooksul. Mõnede vetikaliikide biomass võib kahekordistuda isegi iga 4 tunni tagant (kasvufaasi kõrgajal mõnel vähem kui 3,5 tunni jooksul) (Chisti, 2007), millest tulenevalt on nende tootlikkus pindalaühiku kohta kordades suurem kui maismaataimedel (Awasthi ja Singh, 2011). Montingelli jt (2015) uuringus viidatakse, et vetikaliikide tootlikkus võib olla kuni 20 korda suurem kui tavalistel maismaataimedel, mis teeb neist potentsiaalsema bioenergia tootmise substraadi võrreldes energiakultuuridega.

Tulenevalt mikrovetikate mitmekülgsustest omadustest võib kasvatamiseks kasutada alasid ja keskkondasid, mis on sobimatud teiste kultuuride kasvatamiseks (nt väheviljakad põllumaad, reovesi kasvukeskkonnana jne). Nii ei konkureeri nad ka põllumajandusmaale ning reoveepuhastusjaamas saab neid kasutada toitainete ja toksiliste kemikaalide eemaldamiseks (Andersson jt, 2011), hoides sedasi kokku veepuhastuskuludelt. Erinevalt põllukultuuridest ei vaja vetikad ka herbitsiidide, pestitsiidide ja fungitsiidide kasutamist (Brennan ja Owende, 2010; Mata jt, 2010; Surendhiran ja Vijay, 2012) ning süsinikallikana võivad kasutada CO₂ heitmeid, mis pärinevad eelkõige tööstuslikest jäätmevoogudest (Darzins jt, 2010; Andersson jt, 2011). Seeläbi võimaldavad nad leevendada kasvuhoonegaaside emissiooni atmosfääri.

1.1.1 Kliima

Kuigi vetikad on võimelised kasvama kõikjal maailmas – nii vees, maismaal kui ka õhkkeskkonnas, mõjutab kliima igat üksikut liiki erinevalt. Nimelt on igal mikrovetika liigil omad optimaalsed kliimaatilised nõuded, mis tagavad maksimaalse tootlikkuse. (Andersson jt, 2011) Olulisemad kasvu mõjutavad kliimafaktorid on päikesevalgus (nii kestus, kvaliteet kui ka intensiivsus) ja temperatuur (Andersson jt, 2011) ning vähemtähtsad, kuid mitte ebaolulised, on sademed, aurumine ja kehvad (sh raskendatud) ilmaolud (nt pilvisus, rahe, tormid jne) (Darzins jt, 2010), millede mõju avaldub peamiselt kasvatamissüsteemi valiku kaudu. Ekstreemsed ilmastikunähtused võivad aga kasvatamissüsteeme (tootmiskompleksi infrastruktuuri) kahjustada (Darzins jt, 2010).

Fotoautotroofsete mikrovetikate kasvamiseks peetakse päikesevalgust kõige olulisemaks faktoriks, millele järgnevad süsinikressurss ja toitained (Jonker ja Faaij, 2013). Päikesevalgusest on kõige olulisem valge aja (sh päikesepaiste) kestus, kuna nad vajavad valgust energiaallikana fotosünteesi läbiviimiseks. Mida pikem on valge aja kestus, seda rohkem on võimalik neil biomassi juurde kasvatada. Päikesevalguse puudumisel (öösel) ning ka kehvade pilviste ja sombuste ilmade ajal fotoautotroofsete vetikate reproduktsiooni kiirus väheneb ning sel ajal tarbivad nad ka vähem CO₂-te (Rösch jt, 2009). Ühtlasi võivad nad öösel kaotada kuni veerand päeval toodetud biomassist pimedal ajal toimuva hingamise tõttu (Chisti, 2007), kuid seda on võimalik vähendada öisel ajal kasvukeskkonna temperatuuri alandamisega (Surendhiran ja Vijay, 2012).

Lisaks mõjutavad mikrovetikate produktsiooni nii päikeseekiirguse hulk kui ka kvaliteet (lainepikkus) (Andersson jt, 2011), kus kõrge valguse intensiivsus võib inhibeerida nii fotosünteesi kui ka kasvu või põhjustada suisa rakkude hävimist (Darzins jt, 2010). Kasvatamiseks peetakse piisavaks summaarset päikeseekiirguse hulka aastas umbes 1500 kWh/m² (Andersson jt, 2011) ning sobilik valguskiirgus on lainepikkuse vahemikus 400–700 nm, mida nimetatakse ka fotosünteesiliselt aktiivseks lainepikkuseks (Janssen, 2002).

Mikrovetikad võimelised ära kasutama rohkem päikeseenergiat kui maismaataimed. Hinnanguliselt suudavad mikrovetikad keskmiselt 4,5% nendeni jõudvast päikeseenergiast ära kasutada biomassi tootmiseks (Andersson jt, 2011; Krustok jt, 2013), samas kui maismaataimede fotosünteesi efektiivsus jääb alla 1% (Ritslaid jt, 2014). Kõrgem fotosünteesikoefitsient võimaldab mikroskoopilistel vetikatel lühikese aja vältel rohkesti

orgaanilist ainet sünteesida. Selleks aga, et kasvatamissüsteemis valgus kõigi vetikateni ühtlaselt jõuaks, on vajalik vetikapuljongi segamine mehaanilise pumpamise või aereerimise teel (Griffiths jt, 2011). Mida efektiivsem on segamine, seda paremini suudetakse pimedaid tsoone vältida. Seejuures lühikesed pimedad perioodid (vilkuv efekt), mis siiski ka kultuuri küllaldasel segamisel tekivad, soodustavad mikrovetikate produktsiooni kiirust isegi rohkem kui pidev kestev valgus (Kukk, 1963; Janssen, 2002; Chisti, 2007). Ühtlasi on lühiajalised pimedad perioodid kasulikud, kuna mikrovetikate fotosünteesisüsteem saab taastuda (Chisti, 2007; Griffiths jt, 2011).

Päikese aktiivsus avaldab mõju aga ka välisõhu temperatuurile, mis omakorda mõjutab mikrovetikate kasvukeskkonna temperatuuri. Eri liiki vetikatel on erinevad optimaalsed kasvutemperatuurid. Enamus mikrovetikaid on fotosünteesiliselt aktiivsed, kui nende kasvukeskkonna temperatuur on üle 10°C, seejuures optimaalne temperatuur fotosünteesi läbiviimiseks oleks vahemikus umbes 15-35°C (Arnold, 2013). Seega suurem biomassi tootlikkus oleks temperatuuritsoonis, kus aasta keskmine õhutemperatuur on üle 15°C (Andersson jt, 2011), kuid see sõltub muidugi ka vastavast vetikaliigist. Ühtlasi peab aastaringseks mikrovetikate tootmiseks kuu keskmine temperatuur ka külmematel kuudel ületama 15°C (Darzins jt, 2010). Kuigi vetikad võivad taluda optimumist madalamaid temperatuure, siis temperatuurikasv 2-4°C üle optimaalse võib põhjustada juba vetikamassi hävimise (Mata jt, 2010). Seega võib ka liiga kõrge temperatuur pärssida kasvu ning ühtlasi põhjustada suuremat aurustumist ja veekadu (Andersson jt, 2011).

1.1.2 Süsihappegaasi ressursid

Optimaalne vetikate kasv toimub süsihappegaasiga rikastatud keskkonnas, sest fotosünteesivate mikrovetikate jaoks on CO₂ põhitoitaineline ehk süsiniku allikas kasvuks (Mata jt, 2010). Kuna mikrovetikad on tõhusad CO₂ sidujad, siis ligi poole nende kuivast biomassist moodustabki süsinik (Demirbas, 2010; Andersson jt, 2011). Mida kõrgem on CO₂ sidumise kontsentratsioon, seda suurem on ka biomassi tootlikkus ja seetõttu on CO₂ defitsiit isegi problemaatilisem kui mineraalsete toitainete defitsiit (Heitur, 2014). 1 tonni vetikamassi kasvatamiseks on vaja ligikaudu 1,8 tonni CO₂-te, mis ühtlasi tähendab seda, et 1 tonni biomassi tootmisel seoksid vetikad 1,8 tonni CO₂-te (Wang jt, 2013).

Süsihappegaasi on võimalik siduda välistest süsinikallikatest nagu süsinikku sisaldavast reoveest, biogaasi puhastusprotsessist, tööstuse suitsugaasidest (sh näiteks biogaasi põletamisest) kui ka atmosfäärist (Andersson jt, 2011). Ent võrreldes teiste allikatega on

atmosfääris sisalduva CO₂ kontsentratsioon palju väiksem. Reovees leiduv CO₂ tekib bakterite hingamise tulemusena ning kui mikrovetikad sealses keskkonnas elaksid, kasutaksid nad selle ära kasvamiseks, varustades seejuures ise baktereid hapnikuga (Muñoz ja Guieysse, 2006). Samuti on võimalik edukalt ära kasutada biogaasi põletamisel või puhastamisel tekkiv CO₂, mis on eriti kasulik integreeritud süsteemitingimustes, mil mikrovetikate kasvatamissüsteem siduda biogaasi tootmisega (Wang jt, 2013).

Süsihappegaasi kogumine ja säilitamine on tõenäoliselt vajalik tegevus statsionaarse energia pakkujatele ja teistele suurtele tööstustele, kes emiteerivad CO₂-te. Sellest tulenevalt pakuksid ettevõtted kasvatamiseks süsinikressurssi ja mikrovetikad omakorda neile alternatiivi CO₂ kogumiseks ja säilitamiseks. Seejuures võiks mikrovetikate tootmine toimuda tööstusharudes või nende lähedal, sest see vähendaks CO₂ transpordist tulenevaid kulusid (juhtimissüsteemi väljaehitamine on siiski vajalik). Ühtlasi peab arvestama ka seda, et kui elektri jaam ja enamused tööstusettevõtteid toodaks CO₂-te 24 tundi ööpäevas, kuid mikrovetikad tarbivad seda vaid päevavalguses, siis öisel ajal pole võimalik CO₂-te siduda. Võimalik oleks see olukorras, kui luuakse vastavad tingimused mikrovetikate ööpäevaseks kasvatamiseks. (Darzins jt, 2010)

Kuigi mikrovetikad tunduvad olevat alternatiivsed süsiniku kogujad ja säilitajad, siis mitte kõik heitkogused ei sobi kinnipüüdmiseks ning sobitamine mikrovetikate tootmiseks võib olla kohati keeruline, seda nii suitsugaaside omaduste kui ka mikrovetikate kohastumuste tõttu. Suitsugaaside eeliseks on aga see, et heide sisaldab peale süsihappegaasi veel lämmastikoksiide, väävlioksiide ja teisi keemilisi elemente, mis sooladena on vajalikud mikrovetikate normaalseks elutegevuseks ning ühtlasi saab põlemisprotsessis tekkivat soojust kasutada osaliselt kasvatamiskeskonna soojendamiseks (Heitur, 2014). Kuna aga elektri jaamade ja teiste tööstusettevõtete suitsugaasid sisaldavad kõrgeid CO₂ kontsentratsioone, on oluline leida CO₂-te hästitaluvaid vetikaliike (Heitur, 2014). Eesti Maaülikoolis läbiviidud laborikatse tulemusena leiti, et mikrovetikas *Chlorella vulgaris* *Beyerinck* suudab siduda energiasektoris tekkivaid kuni 14%-lise CO₂ sisaldusega suitsugaase (Heitur, 2012). Edaspidisteks katseteks soovitas Heitur (2014) katseid sooritada CO₂ kontsentratsioonidel 12-30%, et tagada Eesti energiasektoris tekkivate suitsugaasides sisalduva CO₂ sidumise kindlus ning katseid võiks teostada mikrovetikaga nagu *Scenedesmus obliquus*, kes peaks taluma kõrgemaid CO₂ kontsentratsioone ja näitama head biomassi juurdekasvu.

1.1.3 Toitained

Mikrovetikate biomassi kasvatamiseks on tarvis süsinikallikaid (vt ptk 1.1.2) ning peamised vajalikud toitained on lämmastik (N), fosfor (P) ja kaalium (K) (Darzins jt, 2010). Lisaks põhilistele anorgaanilistele toidainetele, vajavad nad efektiivseks kasvuks ka mitmeid mikrotoitaineid (Darzins jt, 2010) ning vitamiine (Prajapati jt, 2013). Vajalikud mikroelemendid on naatrium (Na), magneesium (Mg), kaltsium (Ca), mangaan (Mn), tsink (Zn), vask (Cu), raud (Fe), molübdeen (Mo) (Prajapati jt, 2013) ja väävel (S) (Darzins jt, 2010). Raud ja magneesium omavad olulist rolli fotosünteesis, sest nende piisav hulk soodustab otseselt CO₂ sidumist ja biomassi tootmist (Heitur, 2014). Tsink, vask ja mangaan on seotud jällegi rakkude jagunemisega (Heitur, 2014). CO₂ kontsentratsiooni kasv toitekeskkonnas tingib aga nitraatide sisalduse vähenemise mikrovetikates (Heitur, 2014). Klorofüllil hulk mikrovetikates sõltub aga tugevasti lämmastiku hulgast ja allikast (Kukk, 1963). Lämmastik on esimene element, mis toitelahustest esimesena ära kasutatakse ja seepärast peab masskultuuride kasvatamisel eriti tähelepanelikult jälgima lämmastiku hulga muutusi, sest see võib omakorda põhjustada väga suuri muutusi vetikate kasvutempos ja keemilises koostises (Kukk, 1963).

Kuigi liigiti on toidainete nõudlus erinev, siis üldiselt 1 tonni mikrovetika biomassi kasvatamiseks on vajalik ligikaudu 1,8 tonni CO₂, 70 kg N, 10 kg P ja 8 kg K (Wang jt, 2013). Kui toitaineid on liiga vähe ehk kui tekib toidainete defitsiit, põhjustab see tavaliselt CO₂ sidumise languse ja rakukasvu pidurdumise, toidainete üleküllus on aga lihtsalt ressursside raiskamine ja tõstab lisaks kasvatamise maksumust (Heitur, 2014).

Toidainete allikateks võivad olla lisaks kasvukeskkonnas leiduvatele toidainetele ka toiteelemente sisaldavad põllumajanduslikud mineraalväetised ja reovesi ning veel võivad toitained nagu lämmastikku ja väävlit sisaldada ka energiatootmis- ja tööstusjaamadest õhku paisatavad suitsugaasid, mis on ühtlasi ka peamised süsinikallikad ehk CO₂ kandjad. (Darzins jt, 2010)

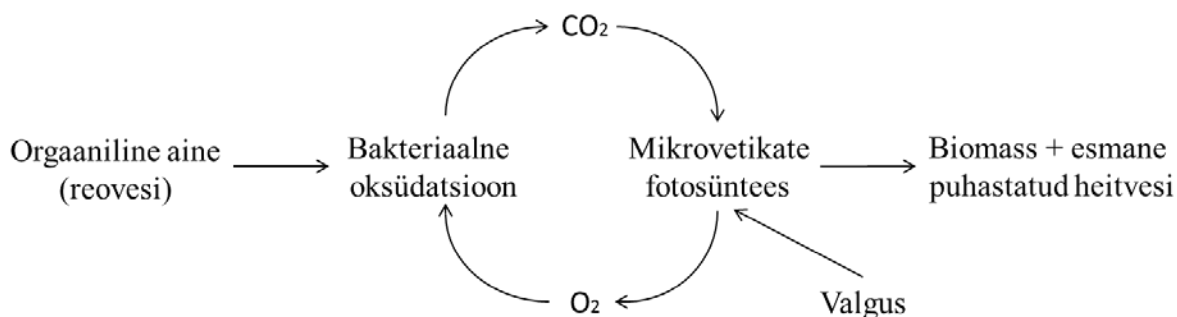
1.1.4 Veeressursid

Üks peamisi eeliseid mikrovetikate kasvatamises erinevalt maismaataimedest on see, et neid saab kasvatada vähese veekasutusega ning lisaks mageveele võib kasutada joogiveeks kõlbmatuid veeressursse nagu merevett, riimvett või ka reovett. Nii peetakse üheks võimaluseks kasvatada mikrovetikaid rannikualadel kasutades soolaseid veeressursse

(Darzins jt, 2010), kuid sisemaal võiks mikrovetikate kasvukeskkonnana kasutada näiteks tööstuse jääkveeressurse ja reoveepuhastusjaamade reovett (Arnold, 2013). Viimasele on eriti tähelepanu pööratud, kuna on leitud, et mikrovetikad on võimelised reovett toitainetest ja muudest keemilistest elementidest puhastama (Mehta ja Gaur, 2005; Krustok jt, 2012).

Reovee, eriti munitsipaalreovee, kogus on paljudes linnades suur ning lisaks sellele annab puhastusjaama infrastruktuuri olemasolu võimaluse kasvatada mikrovetikaid uusi rajatise ehitamata (Darzins jt, 2010). Kuna munitsipaalreovesi sisaldab piisavalt, ent mitte toksilises koguses toitaineid, on see mikrovetikate kasvukeskkonnana kasutatav ilma erilise töötluseta. Seega nii investeerimise kui ka toitelahuse (toitained+vedelik/vesi) kuludelt on võimalik kokku hoida. Ent võrreldes tavalise toitelahusega, on reovesi oma koosluse poolest oluliselt erinev, sisaldades ka väga palju erinevaid mikroorganisme (Muñoz ja Guieysse, 2006). Kui siduda mikrovetikate kasvatamine reoveepuhastusjaamaga, siis oleks kasu mõlemapoolne: mikrovetikad saaksid toota biomassi tänu sellele, et reovesi täidab nii kasvukeskkonna kui ka toiteaineallika eesmärgi ning lisaväärtusena tõhustaks see reovee bioloogilist puhastust (Joonis 1) (Muñoz ja Guieysse, 2006). Feng jt (2011) on näidanud, et 1 tonni vetikamassi tootmisel on võimalik käidelda rohkem kui 1400 m³ heitvett.

Mikrovetikate kasvatamissüsteeme võib kasutada näiteks reovee sekundaarseks või tertsiaarseks puhastamiseks (Larsdotter, 2006; Arnold, 2013). Kuna enamasti aktiivmudapuhastid eemaldavad reoveest toitained ja lukustavad need reoveesettesse, siis mikrovetikad võimaldavad edukalt toitained eelnevalt eemaldada ja ära kasutada. Neil on lisaks orgaanilise aine ja toitainete (nt lämmastik, fosfor) assimileerimisele võime eemaldada ka muid ühendeid, näiteks raskmetalle (Mehta ja Gaur, 2005; Krustok jt, 2012), metalloide, orgaanilisi toksilisi ühendeid (Maity jt, 2014) ja patogeene (Muñoz ja Guieysse, 2006). Kuna aktiivmudapuhastid ei ole väga head eemaldamaks veest ravimijääke ja hormoone, mis järjest rohkem meie reovette satuvad, siis eeldatakse, et mikrovetikad on võimelised lisaks raskmetallidele ka neid ühendeid siduma. Samuti seoksid mikrovetikad reoveepuhastuse protsessi käigus tekkiva CO₂, mis eraldub, kui bakterid oksüdeerivad orgaanilist ainet ning ühtlasi varustaksid nad omakorda baktereid fotosünteesi käigus vabaneva hapnikuga (Joonis 1). Kuna hapnikurikas keskkond on mikrovetikate endi kasvu inhibeeriv (Chisti, 2007), siis bakteritega koos reovees kasvatamine aitab seda probleemi leevendada. Seega mikrovetikad assimileerivad toitaineid ja fotosünteesi tulemusel lahustunud hapniku kasutavad ära bakterid, et oksüdeerida reoveejäätmeid (Montingelli jt, 2015).



Joonis 1. Fotosünteesilise oksüdatsiooni põhimõtte bioloogilise hapnikutarbe (BHT) alandamisel (Muñoz ja Guieysse, 2006 järgi).

Ka katsetulemused on näidanud, et mikrovetikad kasvavad reovees üsna edukalt, hoolimata sellest, et tegu pole spetsiifiliselt neile mõeldud toitelahusega ja seal leidub veel teisigi mikroorganisme, kes reovett puhastavad (Abinandan, 2013; Arnold, 2013). See on kinnitust leidnud ka Tartu Ülikoolis läbiviidud laborikatse tingimustes, kus uuriti reoveekäitluseks sobiva vetika-bakterikoosluse väljakujunemist ning mille tulemusena arenes välja vastupidav vetika-bakterikonsortsium, mis viis pikaajaliselt läbi süsiniku-, lämmastiku- ja fosforiärastust mitteoptimaalsetes tingimustes (Salo, 2014).

1.1.5 Maakasutus ja asukohavalik

Suuremõõtmeliseks mikrovetikate masskultuurina kasvatamiseks on vajalik võrdlemisi suuri ja tasaseid alasid. Maa kättesaadavust mõjutavad paljud füüsikalised, sotsiaalsed, majanduslikud, õiguslikud ja poliitilised asjaolud. Ühtlasi võib maakasutus piirata süsteemide paigaldust oma kõrgete maksumuste, väärtusliku põllumajandustegevuse, kultuurilise väärtuse ning keskkonnapiirangute tõttu (Darzins jt, 2010). Samuti on maa ressurss, mille kasutamise pärast konkureerivad mitmed tööstusvaldkonnad. Maakasutusest tulenevad peamised konfliktid võetakse inglise keeles kokku 4 F-na: toiduained (*food*), söödad (*feed*), mets (*forest*) ja kütus (*fuel*) (Värnik jt, 2010). Survet maakasutuse osas saakski vähendada, kui kasvatada mikrovetikaid, sest nende kultuuride kasvatamine bioenergia tootmise eesmärgil ja selleks vajalike süsteemide väljaehitus nõuab oluliselt vähem maad pindalaühiku kohta kui ükski teine bioenergia lähtematerjal (Darzins jt, 2010). Seega väheneks konkurents toidu ja energeetiliste kultuuride osas.

Mastaapaks mikrovetikate kasvatamiseks sobiks süsteemid rajada kasutusest väljasolevale põllumajandusmaale, kuid topograafia ja pinnase omadused võivad piirata olemasoleva maa

kasutust kasvatamissüsteemide rajamiseks. Kuigi süsteemide disainlahendusi on erinevaid, eeldab paigaldus siiski võrdlemisi tasast maastikku. Seetõttu piirkonnad, kus kalle on rohkem kui 5%, võib sobilike alade hulgast üldiselt välja jätta. Mitte ainult seetõttu, et vajalik on eritehnoloogia, vaid ka suurenenud kulutuste tõttu, mis tuleneksid ala arendamisest. (Darzins jt, 2010) Lisaks tuleks ratsionaalsusest lähtudes võimalikust kasutatavast pindalast välja arvata logistiliste piirangutega alad ning soovitatavalt ka alad, kus ei kehti läheduse põhimõte ehk lähedus vee- ja süsinikressurssidele, toitainetele ning muudele optimaalseks kasvuks vajalikele ressurssidele. Ühtlasi peab tootmissüsteemide rajamisel arvestama ka ala terviklikkust. Vajalik maa-ala suurus mikrovetikate kasvatamiseks on nii vajalikust toodetavast biomassi kogusest kui ka kasvatamissüsteemi projektlahendusest ehk tuleb arvestada kogu rajatava kompleksi terviklahenduse jaoks vajaliku pindalaga.

Arvestades kasvuks vajalike ressursside kättesaadavuse lähedust, siis mikrovetikate kasvatamissüsteem on otstarbekas rajada integreeritud süsteemina juba olemasolevate energiatootmis- või veepuhastusjaamade juurde või nende lähedusse. Ent siingi seab piirangu rajatiste ja tootmiskompleksi ümber paikneva maa kasutamise võimalikkus, terviklikkus ja ka maksumus.

Asukohavalikut logistilise lähenemisega on hinnanud Slegers jt (2015), mis on esimene sellelaadne uuring, analüüsides energiatarbimist vetikate kasvuks vajalike ressursside transportimiseks ning jõudes järeldusele, et asukohavalikut mõjutab eelkõige ressursside jaotus ja kättesaadavus, mis määrab transpordi ja seega ka tootmiskulud. Arvestama peab ka vetikaliigi valikut ja produktsioonivõimet vastavas piirkonnas, mis on muidugi kohaldatav optimaalsete kasvutingimuste loomisega, ent nõuab lisaenergiat ja kulutusi. Seetõttu on oluline ka, et fotoautotroofsete mikrovetikate tootmiskohas oleks avatus päikesele, et nad saaksid maksimaalselt ära kasutada päikeseenergiat ja valget aega biomassi kasvatamiseks. Et töötada välja terviklik pilt ideaalsetest piirkondadest (sh kohtadest) mikrovetikate kasvatamiseks nõuab veel palju jõupingutusi.

1.2 Mikrovetikate kasvatamissüsteemid

Sõltuvalt kasvatamise asukoha tingimustest ja mikrovetikate omadustest, tuleb välja selgitada ja kasutusele võtta sobivaimad kasvatamistehnoloogiad. Mikrovetikate kasvatamiseks on välja töötatud erinevaid looduslikke ja tehisklikke süsteeme. Neid saab jagada järgmiselt:

- avatud looduslikud süsteemid — ekstensiivsed tiigid või avatud tiigid („*extensive or open ponds*“);
- avatud tehislikud süsteemid — intensiivsed tiigid või ringvoolukanalid („*intensive or raceway ponds*“);
- suletud fotüsünteesivad süsteemid — fotobioreaktorid („*closed photobioreactors*“);
- suletud (pimedad) fermentaatorsüsteemid — käärimiskambrid ehk kääritud („*closed fermenter systems*“). (Darzins jt, 2010)

Üldiselt jagatakse kasvatamissüsteemid kahte suuremasse kategooriasse – avatud (tavaliselt ringvoolukanalid) ja suletud süsteemid (tavaliselt fotobioreaktorid). Mõlemaid reaktoreid on väga erinevate disainlahendustega (Dębowski jt, 2013). Ühtlasi on igal süsteemil omad eelised ja puudused (Tabel 1) (Ho jt, 2011; Griffiths, 2011; Medipally jt, 2015), mis vastavate süsteemide kirjeldamise teemapeatükkides (ptk 1.2.1 ja ptk 1.2.2) täpsemalt ka välja tuuakse.

Veel on kasvatamissüsteemina võimalik kasutada avatud ja kinnise süsteemi kombinatsiooni ehk nn hübriidsüsteemi, mis ühendab avatud tiiki kinnise süsteemi kontrollitud keskkonnaga, mil mikrovetikaid kasvatatakse esmalt kinnises bioreaktoris ning seejärel juhatakse vetikapuljong avatud tiiki. (Andersson jt, 2011; Medipally jt, 2015) Magistritöö piiritlemise tõttu aga hübriidsüsteeme käesolevas töös ei käsitleta.

Tabel 1. Avatud ja suletud kasvatamissüsteemide võrdlus (Ho jt, 2011; Griffiths, 2011; Medipally jt, 2015 järgi).

Parameeter	Avatud süsteem	Suletud süsteem
Fotosünteesi efektiivsus	Madal	Kõrge
Biomassi produktiivsus	Madal	Kõrge
Populatsiooni tihedus	Madal	Kõrge
Saastumise risk	Väga kõrge	Madal
Sõltuvus ilmast	Kõrge	Madal-keskmise
Kasvutingimuste kontroll	Väga keeruline	Lihtne
Investeering	Väike	Suur
Installatsioon	Lihtne	Keeruline
Käitamine	Lihtne	Keeruline
Segamise efektiivsus	Madal	Kõrge
CO ₂ sidumisvõime	Kehv	Suurepärane
O ₂ kontsentratsioon	Madal	Kõrge
Hooldus	Lihtne	Keeruline
Kogumise efektiivsus	Madal	Kõrge

Parameeter	Avatud süsteem	Suletud süsteem
Pindala-ruumala suhe	Väike	Suur
Maa nõudlus	Kõrge	Madal
Energianõudlus	Madal	Kõrge
Veekasutus	Kõrge	Madalam
Veekadu aurumise tõttu	Väga kõrge	Madal, välditav

Tabelis 1 on välja toodud olulisemad erinevaid kasvatamissüsteeme iseloomustavad parameetrid. Kuna fotobioreaktorid võimaldavad süsteemi pidevat kontrolli, on seal kasvatatava vetikamassi tootlikkus suurem kui avaveelistes kasvatamissüsteemides, kuid olulisteks puudusteks on süsteemi suur maksumus ja energianõudlus. Kuigi kliimaatilised tegurid avalduvad kasvatamissüsteemidele ühtmoodi, on avatud tiigisüsteemid ilmastikuolude suhtes tundlikumad: keskkonnale avatus põhjustab toitainete sisalduse ja veekeemia muutust vastavalt ilmaoludest (sademed, aurumine jne) ning süsteemi võivad sattuda õhust, töödeldud veest või vihmavee äravoolust patogeeneid, võõrliigid (tulnukorganismid) jm. Avatud tiikides tuleb hoida ka vesi sobival kõrgusel, et fotosünteesiks oleks piisavalt valgust. Kõikides kasvatamissüsteemides toimub aga pidev veevahetus, millega ühelt poolt antakse juurde CO₂-te ja toitaineid ning teiselt poolt viiakse kasutusel olnud vesi välja. Kui kasvatada mikrovetikate biomassi energia tootmiseks, nõuab see suure mahtuvusega, odavat, suure tootlikkusega ning seega majanduslikult tasuvat tootmisprotsessi, kus ka tegevuskulud peavad olema madalad.

Väliskeskkonnast tulenevate mõjude vältimiseks ning pidevaks ja ühtlaseks tootmiseks on võimalik mikrovetikaid kasvatada sisetingimustes väliskeskkonnast eraldatuna (Wang jt, 2013) ning kasutades kunstlikku valgustust (Chisti, 2007). Kasvuhoone tüüpi rajatised võimaldavad kasvatamissüsteemide ümber luua kasvatamiseks sobiva stabiilse ja kontrollitava mikrokliima (Wang jt, 2013), millega tagatakse sealhulgas ka vajalik temperatuur. Lisaks on ööpäevaseks tootmiseks vajalik valgustatus pimedal ajal, mis tähendab, et lisaks looduslikule valgusele tuleb kasutada kunstlikku valgust (lampe nagu nt hõõglampe, neonlampe, luminescentslampe jne). Süsteem nõuab aga lisaenergia kasutamist ja seetõttu kallineks mikrovetikate kasvatamine.

1.2.1 Avatud ehk lahtised kasvatamissüsteemid

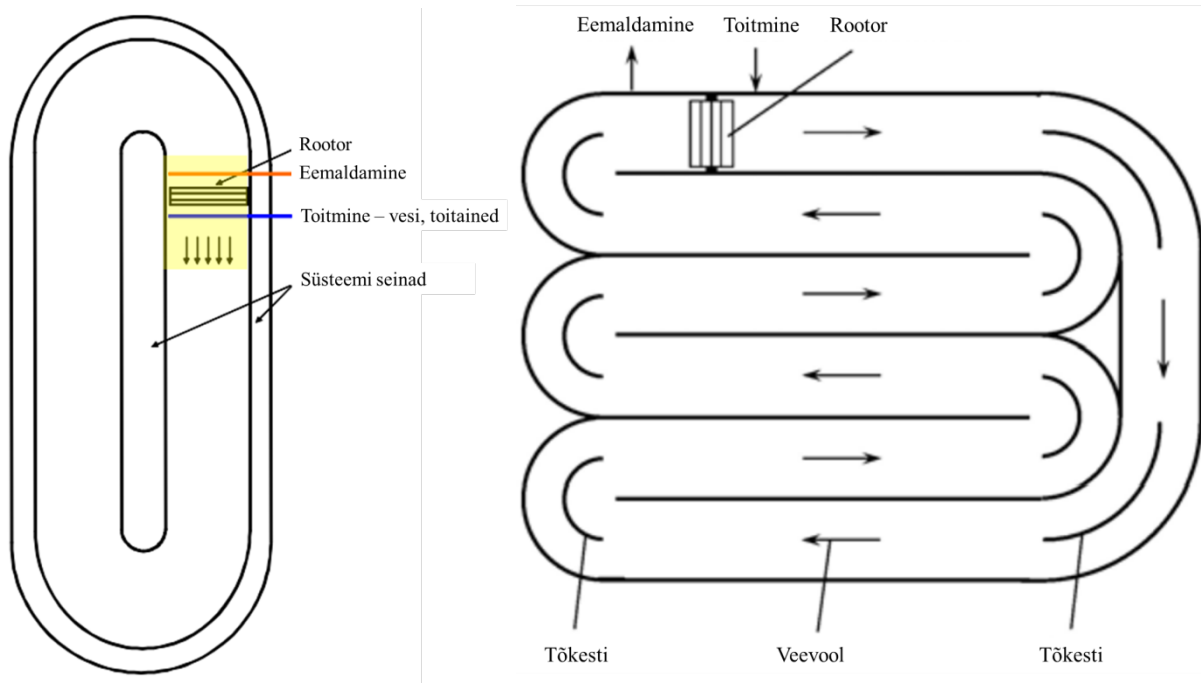
Kasvukohana võib kasutada nii ekstensiivseid looduslikke veekogusid nagu tiigid, ojad, jõed, järved, ookeanid või intensiivseid tehisklikke süsteeme nagu ringvoolukanalid, ringtiigid ja kaldsüsteemid. Ulatuslikud ekstensiivsed vetikate kasvatamise tiigid on piiratud segamisega

ning sõltuvad looduslikust valikust ja tingimustest Süsteemid on loodusliku toitumisrežiimiga, kasvatamine toimub välistemperatuuri juures ja võimalikult looduslähedastest oludes, mis tähendab, et tiigid on pidevas vastastikmõjus väliskeskkonnaga. Peamiselt on nad kasutusel reoveepuhastusjaamade juures ning nende eesmärgiks pole otseselt vetikamassi tootmine, vaid pigem reovee puhastamine. (Darzins jt, 2010) Seega enim pööratakse mikrovetikate tööstustootmisel tähelepanu intensiivsetele tehislakele kasvatamissüsteemidele, mis on mikrovetikate masstootmise üks lihtsamaid ja tuntumaid (vanimaid) süsteeme (Surendhiran ja Vijay, 2012). Insenerilahendusi on nende tiigisüsteemide puhul erinevaid, nii on veel lisaks kirjanduses enim kirjeldatavatele ringvoolukanalitele samal põhimõttel töötavad ringtiigid, kus vetikamassi segatakse pöörleva teljega ja kaldsüsteemid, kus vett hoitakse liikuvana pumpamise ja gravitatsiooni abil (Mata jt, 2010; Andersson jt, 2011). Erinevat tüüpi avatud tiikide omadusi, tootlikkust ja toimimist on oma töös uurinud näiteks Suali ja Sarbatly (2012) ning leidnud, et ringvoolukanalitel on kõige paremad mikrovetikate kasvatamist soodustavad omadused.

Kirjanduses leiavadki intensiivsete süsteemidena enamasti käsitlemist ringvoolukanalid, mis on madalad (tavaliselt 30 cm) ja pikliku kujuga kahesuunalise tsirkuleeriva veega süsteemid (Joonis 2), mis võivad olla erineva pikkuse ja läbimõõduga (Demirbas, 2010; Andersson jt, 2011). Süsteemid võivad olla kas maasse kaevatud ja kilega vooderdatud või enamasti siiski betoonist valmistatud (vooderdatud plastiku või tsemendiga), kus veevoolu ümbersuunamiseks kasutatakse juhtvaheseinu, tekitades ovaalse käänulise vee liikumistee (Chisti, 2007; Darzins jt, 2010). Vetikapuljongi liikuvuses hoidmiseks, et vältida selle settimist ja vajalike toitainete ühtlast jaotumist, kasutatakse enamasti rootoreid (või muid pöörlevaid seadeldisi) ning pumpasid. Süsteem ei võimalda aga kõige paremini vett ja vetikamassi segada ning nii ei suudeta pimedaid tsoone ehk varjutamist vältida, mistõttu biomassi kontsentratsioon jääb väikeseks. (Chisti, 2007; Darzins jt, 2010; Awasthi ja Singh, 2011).

Vetikate produktsiooni võivad aga häirida ja oluliselt vähendada soovimatud ilmastikuolud ning saastumine erinevate vetika võõrliikidega, bakteritega ja patogeenidega, kes võivad sattuda kasvatamissüsteemi. Samuti on liikide kasvuks sobivaid keskkonnatingimusi ja veekeemiat (veetemperatuur, pH, hapnikusisaldus, CO₂ viibeaega vedelkultuuris jt) keeruline säilitada ja kontrollida. Puuduseks on ka vee aurustumine, mida võivad kompenseerida sademed, ning CO₂ difusioon atmosfääri. (Griffiths jt, 2011) Teisalt aga saavutatakse aurumisprotsessiga süsteemi vajalik jahutamine (Chisti, 2007). Süsteemid sõltuvad väga palju

ka päikeseenergiast ja seetõttu on nad rohkem tundlikud päikesekiirguses suhtes, nii fotosünteesiks vajaliku valgushulga kui ka veitemperatuuri suhtes. Suureks eeliseks on aganende süsteemide puhul ehitamise, installeerimise ja eksploatatsiooni suhteline odavus ja lihtsus.



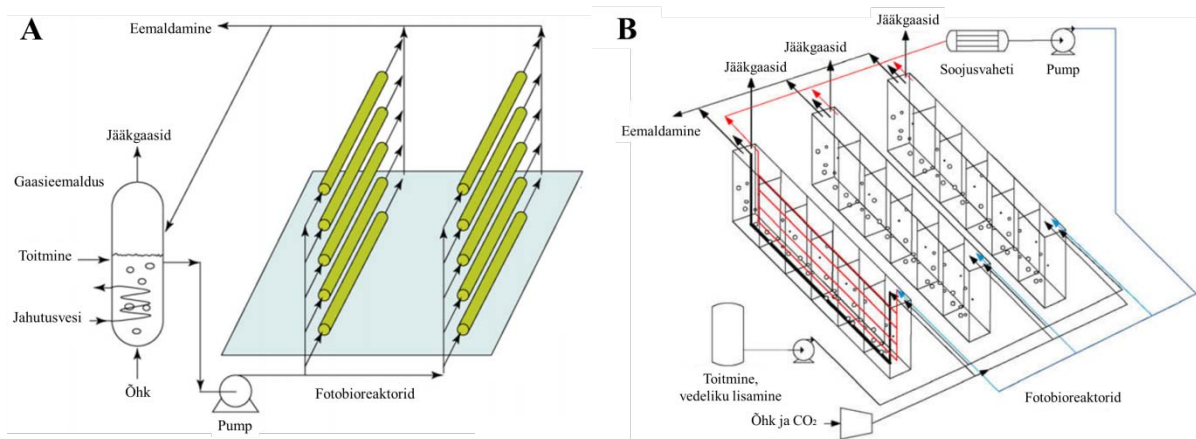
Joonis 2. Tüüpiline ringvoolukanali mudellahendus pealtvaates (vastavalt Darzins jt, 2010 ja Chisti, 2007 järgi).

1.2.2 Suletud ehk kinnised kasvatamissüsteemid

Mikrovetikate kasvatamine võib toimuda ka kinnistes reaktorites: fotobioreaktorites, mis põhinevad mikrovetika fotosünteesivõimel või ka pimedate tingimuste juuresolekul käärimistankides ehk fermenteerijates (Darzins jt, 2011). Suletud süsteemina toimivate reaktorite vastastikmõju väliskeskkonnaga on minimeeritud ja kontrollitav ning neis saab luua steriilse kasvukeskkonna. Süsteemides on võimalik kasvatada rohkem erinevaid liike ning soovitud liigid püsivad kauem dominantsetena.

Heterotroofseid mikrovetikaid on võimalik kasvatada fermenteerijates, mis on kinnised ja pimedad kasvatamissüsteemid ning kus suhkruid (sh teisi lihtsaid orgaanilise süsiniku allikaid) ja O_2 eelistatakse päikesevalgusele ja CO_2 -le. Oluliseks puuduseks on väga suur nõudlus kõrge väärtusega süsivesikute järele. (Darzins jt, 2010) Kuna käesolev magistritöö käsitleb fotoautotroofsete mikrovetikate kasvatamist, siis neid süsteeme pikemalt ei käsitleta.

Fotoautotroofsete mikrovetikate kasvatamine võib seega lisaks avatud tiigisüsteemidele toimuda fotobioreaktorites, milleks on läbipaistvast ja õhukesest materjalist (tavaliselt plastmassist või polüetüleenist) mahutid nagu plaatjad reaktorid, torud, kolvid, kotid jm, kuid igal tüübil on omad eelised ja puudused (Ho jt, 2011; Bahadar ja Khan, 2013). Samuti võivad olla erineva insenerilahendusega paneelid pööratavad, ent nad peavad asuma üksteisest piisavalt kaugel, et vältida varjutamist. Enamlevinud bioreaktori tüüpideks, millele ka kirjandusallikates viidatakse, on vertikaalsed torujad ja plaatjad reaktorid (Joonis 3, vastavalt A ja B), kus vee ja vetikamassi liigutamiseks süsteemis kasutatakse mehaanilist pumpamist või läbimullitamist (läbipuhumist) kas õhu või CO₂-ga (Heitur, 2014). Viimase puhul juhitakse näiteks plaatjate fotobioreaktorite süsteemi põhja läheduses ühe või mitme ava kaudu gaas vedelikku, kus ta pinnale tõustes paneb vedeliku kogu ulatuses liikuma. Kuid gaasipumbad on vähem paindlikud kui mehaanilised pumbad ning vajavad töötamiseks gaasiga varustatust (Chisti, 2008). Temperatuuri reguleerimist (sh kasvukeskkonna jahutamist) võimaldavad soojusvahetid (Chisti, 2008) või degaseerimise käigus külma või sooja õhu vedelikku suunamine (Joonis 3).



Joonis 3. Fotobioreaktorite tüübid: A) vertikaalne torujas, B) vertikaalne plaatjas (vastavalt Chisti, 2008 ja Jorquera jt, 2010 järgi).

Fotobioreaktorite eeliseks on suur eripind, parem kontroll kasvutingimuste üle (sh võime vältida saastumist ja kliimast tulenevaid mõjutusi), võimalus kasutada rohkem erinevaid vetikaliike ning suur produktiivsus pindalaühiku kohta (Bahadar ja Khan, 2013). Automaatjuhtimissüsteemiga on võimalik kontrollida ja hoida (võimalikult) konstantsena kasvatamissüsteemis nii valgustuse taset, temperatuuri, kasvukeskkonna pH-d, CO₂ ja O₂ sisaldust toitelahuses (Heitur, 2014), ent see nõuab muidugi lisaenergiat. Tehnoloogiliselt

kontrollitav kasvukeskkond tagab ka pikema kasvuperioodi võrreldes avatud kasvatamissüsteemidega ning tänu praktiliselt puudavale aurumisele on veetarbimine väiksem (Medipally jt, 2015).

Kinnine süsteem, suurem pindala-ruumala suhe ja hea segamine võimaldab suurendada CO₂ sidumist, gaasi ülekannet ja head valgusjaotust, tõstes seeläbi ka tootlikkust (Andersson jt, 2011). Lahtiste süsteemidega võrreldes on fotobioreaktorite tootlikkus hinnanguliselt kuni 13 korda kõrgem ning biomass on kuni 30 korda kontsentreeritum, mis teeb ühtlasi vetikate eraldamise kasvukeskkonnast lihtsamaks ning odavamaks (Chisti, 2007). Kuna aga fotosünteesi tulemusena eraldub hapnik, siis on vajalik selle eemaldamine kinnisest süsteemist, sest see võib hakata tootlikkust inhibeerima (Chisti, 2007), kuid näiteks atmosfääri suunatuna aitaks ühtlasi taastada selle hapnikusisaldust.

Üldiselt on fotobioreaktorid teada-tuntud suure mikrovetikate produktioonivõime poolest neis süsteemides, kuid sellele vaatamata pole fotobioreaktoreid tööstuslikes mastaapides laiaulatuslikult kasutusele võetud, sest hetkel on nende puuduseks ehitamise ja tööshoidmise keerukus, suur maksumus ning ebapiisav energeetiline efektiivsus (Ritslaid jt, 2014). Praeguseks on avaldatud ka suur hulk uurimustöid fotobioreaktorite disaini ja töötingimuste optimeerimise kohta, kus peamisteks eeldustena tuuakse välja, et need peavad olema lihtsalt käsitlev, mõistliku hinnaga ja energeetiliselt efektiivsed ning neid peab olema kerge ümbermodifitseerida tööstusliku tootmise mastaapidesse (Heitur, 2014).

1.3 Mikrovetikate eraldamine kasvukeskkonnast

Mikrovetikate biomassi eemaldatakse kasvatamissüsteemist iga päev pidevalt või osade kaupa. Kuid biomassi kogumine on mikrovetikate kasvatamise üks keerukaimaid etappe, sest nende kontsentratsioon kasvukeskkonnas on madal (Darzins jt, 2010; Andersson jt, 2011). Kuna biomassi niiskusesisaldus on suurem kui 99%, siis on see protsess üks kalleimaid ja ühtlasi olulisemaid kulutegureid, mis kaasneb biomassi tootmisega. Umbes 20–30% kogukuludest moodustab biomassi eraldamine kasvukeskkonnast (Demirbas, 2010) ning seetõttu oleks selleks tööprotsessiks vaja leida võimalikult optimaalne ja odav meetod. Tehnoloogia (meetodi) valik sõltub mikrovetika liigist ja omadustest (raku tihedus ja suurus), kasvatamise tingimustest, biomassi hulgast ja aspektist, mida soovitakse biomassist toota, st millised protsessid ootavad ees ning millised nõuded neil on substraadile (Demirbas, 2010; Andersson jt, 2011). Praegu kasutatavad meetodid on suhteliselt kallid (Darzins jt, 2010) ning hõlmavad endas majandus-tehnilisi puudusi (Awasthi ja Singh, 2011).

Biomassi eraldamiseks kasvukeskkonnast on mitmeid tehnoloogiaid, kuid peamised ja kirjanduses enimmainitud on tsentrifugimine, flokulatsioon, gravitatsiooniline setitamine, filtratsioon ja flotatsioon (Demirbas, 2010; Andersson jt, 2011). Kuigi tsentrifugimisega on võimalik eemaldada kiiresti enamus biomassi vetikapuljongist, on see meetod väga energiamahukas ning töö- ja hoolduskulud märkimisväärselt suured (Wiley jt, 2011; Petrick jt, 2013). Flokulantide lisamine biomassi osakeste liitmiseks ja setitamiseks ning paremaks kogumiseks on tõhus, kuid nende kasutamine on kallis ning kemikaalid võivad mõjutada järgneva protsessi. Gravitatsioonilise meetodiga setitatakse tahked osakesed vedelikus raskusjõu või mõne muu jõu mõjul (Griffiths jt, 2011), kuid see on aeganõudev ning settetangid hõivavad palju ruumi ja pindala (Petrick jt, 2013). Filtreerimisprotsessiga saab hästi eemaldada flokuleerunud või kolooniaid moodustavaid mikrovetikaid, ent puuduseks on filtrite ummistumine, mis põhjustab protsessi jõudluse vähenemise (Petrick jt, 2013). Flotatsioon on aga gravitatsiooniline eraldusprotsess, kus õhu või gaasi mulle tekitades ujutatakse tahke osa vedeliku pinnale ja kogutakse kokku kooriva mehhanismina (Ho jt, 2011; Surendhiran ja Vijay, 2012).

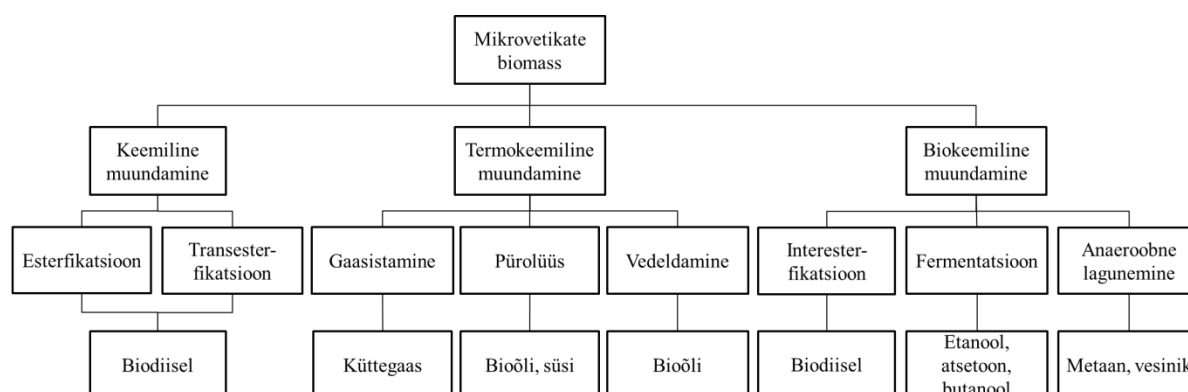
Kui pideva tootmise juures mikrovetikate kontsentratsioon reaktorites võib olla isegi vähem kui 0,1% vetikamassi kuivaine kohta, siis flokulatsiooni, setitamise või flotatsiooni kasutamisel on kuivaine sisaldus saavutatav 2–7% (Chen jt, 2011; Milledge ja Heaven, 2013), samas filtratsiooni või tsentrifugimise kasutamisel on see juba 10–20% (Wiley jt, 2011; Milledge ja Heaven, 2013). Meetodi valik sõltub oluliselt edasisest eesmärgist, milleks biomassi kasutada. Küll aga pole ükski meetod osutunud veel universaalselt kasutatavaks, kuid neid on lihtsam koguda, kui nad on eelnevalt koondunud ehk moodustanud nõ suuri klompe (helvestunud, agregeerunud). Üldiselt flokulatsiooni ja tsentrifugimisega kogutakse biomassi mikrovetikatest kõrge väärtusega produktide toomiseks. Biokütuste tootmiseks on soovitatud kasutada gravitatsioonilist setitamist koos flokulatsiooniga (Ho jt, 2011).

Kuna pärast eraldamist on mikrovetikate biomass endiselt märg ja olenevalt kasutatud eemaldusmeetodist sisaldab erinevas koguses vett, siis võib esineda vajadus biomassi kuivatamiseks, kuid selle tingimuse seab lõpptoode, mida mikrovetikate biomassist soovitakse valmistada või ka transpordivajadus, mil vee eemaldamisega hoitakse kuludelt kokku. Rakusisest vett on võimalik eemaldada pärast vetikamassi eraldamist kasvukeskkonnast valdavalt termaalsete protsesside abil. (Petrick jt, 2013) Üldiselt aga vetikakütuste tootmiseks kuivatusprotsess pole vajalik, kuna töötlemiseks vajalik kontsentratsioon on saavutatav ka juba biomassi paksendamisega.

1.4 Mikrovetikatest biogaasi tootmine

Tänu mitmekülsusest tulenevatele kasulikele omadustele on mikrovetikad tähelepanu pälvinud energia tootmise allikana. Üldiselt on vetikate biomassist kui toorainest biorafineerimise teel võimalik toota nii bioenergiat– kui ka -produkte. Kolm põhilist muundamise viisi, mis on võimalised sobivaid tehnoloogiaid rakendades vetikaid töötlemata on keemiline, termokeemiline ja biokeemiline muundamine (Joonis 4) (Razzak jt, 2013). Vastavaid tehnoloogiaid rakendades toodetakse mikrovetikatest vahesaadusi, millede edasisel töötlemisel on võimalik saada kas kemikaale, biokütuseid, soojust või elektrit. Seejuures vetikaliikide valik sõltub nende eriomadustest (nt kasvukiirus, rakitihedus, lagunemiskiirus jne) ja toodetavast lõpp-produktist.

Käesoleva magistr töö piiritlemise tõttu pööratakse tähelepanu mikrovetikatest biogaasi tootmisele anaeroobse lagunemise teel, sest vastavat meetodit peetakse kõige otsemaks (Rösch jt, 2009; Montingelli jt, 2015), ökonoomsemaks ja tehniliselt optimaalsemaks viisiks mikrovetikatest energia saamiseks (Andersson jt, 2011; Adams, 2014; Ward jt, 2014).



Joonis 4. Vetikaenergia tehnoloogiad (Razzak jt, 2013 järgi).

Mikrovetikatest biogaasi tootmine üldisemalt ei ole uus avastus, sest idee, et vetikate biomassist saab kasutada biogaasi tootmiseks, esitas esmakordselt Golueke jt juba 1957. aastal. Praegu on hakatud aga eelkõige juhtivates kõrgtehnoloogilise innovatsiooniga riikides, kus rohkem keskendutakse biogaasi tootmisele, vastavat tehnoloogiat ja protsesse taas rohkem uurima. Hoolimata vetikatehnoloogia puudustest, mis hetkel seisnevad eeskätt tehnilistes probleemides ja kalliduses, peetakse vetikaid potentsiaalseks ja jätkusuutlikuks energiaallikaks (Darzins jt, 2010), mis toetab ühtlasi biotööstusettevõtete arengut ja elavdab innovatsioonitegevust.

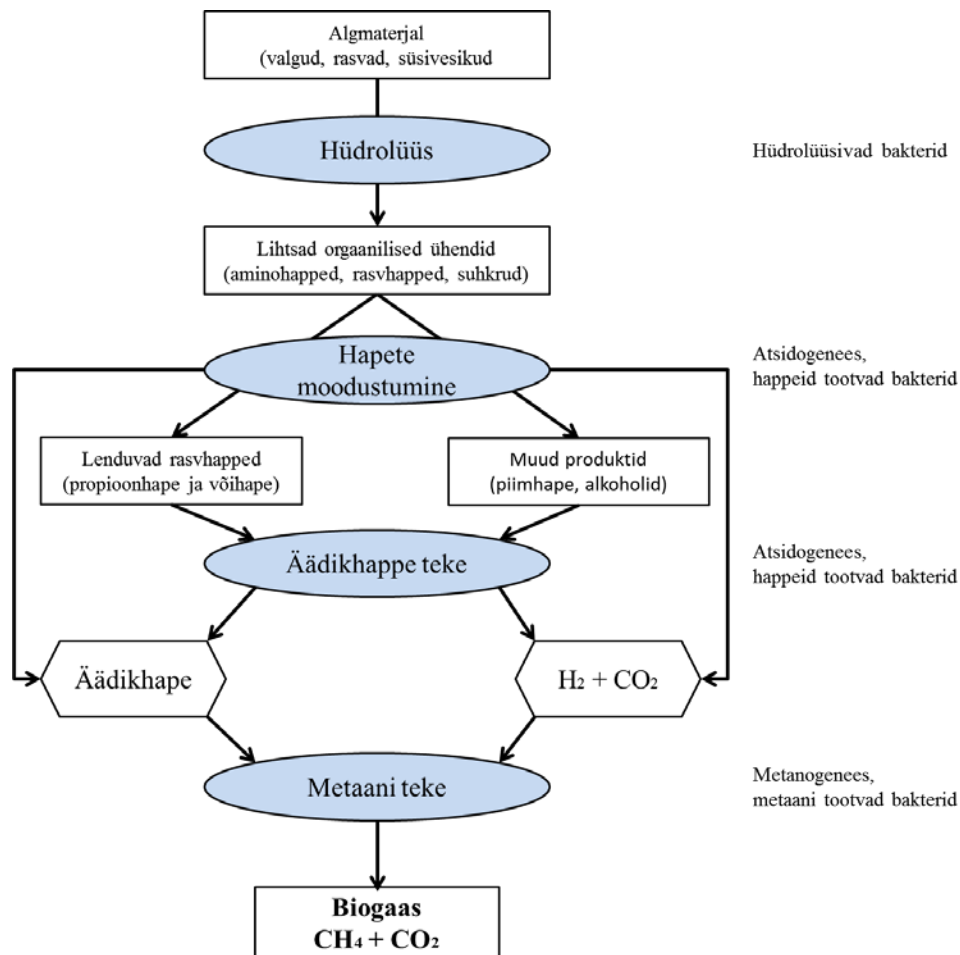
1.4.1 Biogaasi tootmine

Biogaas on gaasiline mittefossiilne kütus, mida toodetakse biolagunevatest substraatidest nagu loomasõnnikust, reoveesetest, toiduainetööstuse jäätmetest ja teistest biojäätmest ning erinevatest taimse biomassi ja vesiviljeluse allikatest. Käesoleva magistritöö kontekstist lähtuvalt käsitletakse biogaasi lähteainena fotoautotroofseid mikrovetikaid. Kuna mikrovetikate eemaldamisega kasvatamissüsteemist satub ühes ka vett, siis biogaasi tootmistehnoloogiatest on märja biomassi töötlemiseks parim kasutada märgkääritamistehnoloogiat (Montingelli jt, 2015), kus sisendtooraine üldine kuivaine sisaldus jääb vahemikku 6–13% (kuni 15%), kuid võib kasutada ka kuivkääritustehnoloogiat, kus kuivaine sisaldus peab jääma vahemikku 20–40% (Menert jt, 2011). Biogaasi tootmisprotsessi kõik tingimused on mikrovetikate anaeroobse lagunemise puhul samad kui teiste substraatide korral ning neid tuleb püüda säilitada.

Anaeroobne lagunemine on jaotatav erinevatesse etappidesse, kus iga etapi eest vastutavad erinevad bakterigrupid (Joonis 5). Biogaasi tootlikkus sõltub eelõige nii bakterite suutlikkusest rakuseinu lõhkuda kui ka viibeajast kääritis, muutes ka raskesti lagundatavad komponendid viimaks kättesaadavaks. Lõpptulemusena teisendab mikroobide populatsioon mikrovetikate orgaanilised ühendid nagu lipiidid, valgud ja süsivesikud biogaasiks. Liigist ja töötingimustest sõltumata sisaldab toodetav biogaas umbes 60–75% metaani (Andersson jt, 2011; Montingelli jt, 2015), mis on suhteliselt kõrge saagis võrreldes teiste substraatidega. Seega tähendab see head metaani tootmiskvaliteeti mikrovetikate orgaanilistest ühenditest.

Ühest tonnist mikrovetikate biomassist saab toota umbes 500 m³ biogaasi (~60% metaanisaldusega (300 m³) ja mikrovetikate 50-60% lagundatavuse juures) (Zamalloa jt, 2011; Craggs jt, 2013; Torres jt, 2013; Montingelli jt, 2015). Kui mikrovetikates sisalduv süsinik suudetakse täielikult lagundada ja konverteerida CH₄-ks ja CO₂-ks, siis teoreetiline biometaani tootlikkus 1 tonni kohta oleks saavutatav isegi umbes 470-800 m³ CH₄ (Wang jt, 2013). Erinevate mikrovetikaliikide metaani tootlikkused anaeroobse lagunemise tulemusena on välja toonud ka Ward jt (2014) ning Montingelli jt (2015). Biogaasi (sh metaani) tootlikkust mõjutavad ka vetikamassi kogus, nende eeltöötlus ja viibeaeg kääritis. Eeltöödeldud mikrovetikate jaoks piisab vähemast viibeajast, kuid töötlemata mikrovetikate puhul on kõrgema CH₄ kontsentratsiooni saavutamiseks vajalik pikem viibeaeg — keskmiselt 20-30 päeva (Zamalloa jt, 2011). Ühtlasi on katsetulemuste põhjal leitud, et mikrovetikate kooskääritamine teiste substraatidega (nt toidujäätmega või reoveesetega) on jätkusuutlikum, sest võimaldab saada suuremat biogaasi saagist kui vetikaid eraldi

lagundades saada oleks võimalik (Krustok jt, 2013; Olsson jt, 2013). Parimaks vahekorra näitena toodavate katsete puhul on osutunud 12% mikorvetikaid ja 88% vastavalt kas toidujäätmeid (Krustok jt, 2013) või reoveesetet (Olsson jt, 2013).



Joonis 5. Skemaatiline anaeroobne lagunemisprotsess biogaasi tootmiseks (Normak jt, 2009 järgi).

Toodetavat biogaasi saab rakendada mitmeti, tavalisim valik on kohapealne põletamine soojuse ja elektri tootmiseks, kuid kasutada saab ka transpordikütusena. Tootmise võib ühendada ka gaasivõrku asendamaks maagaasi, kuid see nõuaks kõrgema väärtusega CH₄ ja seega biogaasi puhastamist CO₂-st. Meetod põhineb CO₂ ja metaani erineval lahustuvusel vees: CO₂ lahustub vees, kuid metaan mitte. Puhastamise tulemusena eraldub CO₂, mida võiks taaskasutada uue mikrovetikamassi kasvatamiseks. Ent biogaasi põletamisprotsessi käigus tekib lisaks energiale suitsugaase, mida on võimalik toiteallikana kasutada. Seega mõlema protsessi puhul saab CO₂-te taaskasutada kasvatamisprotsessis (Andersson jt, 2011).

1.4.2 Mikrovetikate sobivus biogaasi tootmiseks

Biogaasi tootlikkus sõltub suurel määral mikrovetika liigist (omadustest ja koostisest) ja vetikate eeltötlusest (Mussgnug jt, 2010). Tingimused, kus ja kuidas vetikaid kasvatatakse, omavad mõju vetikate keemiliste komponentide sisaldusele ja mõjutavad seega ka lagunemisprotsessi. Kui vetikate koostises lagunevate ainete osakaal muutub, siis muutub ka biogaasi hulk, seda näiteks aastaajati. (Petrick jt, 2013) Mikrovetikad sisaldavad aga lihtsamini lagundatavat süsinikku võrreldes orgaaniliste jäätmetega, mis hõlbustab seega anaeroobset lagunemist (Krustok jt, 2013).

Mikrovetikate liigi valimisel biogaasi tootmise soovist lähtuvalt on oluline liigi suur kasvukiirus ehk biomassi tootlikkus, suur raku suurus ja hea lagunemiskiirus. Ideaalne mikrovetika liik biogaasi tootmiseks oleks süsivesikutel baseeruva, õhukese või puuduva rakuseinaga, suure rakusuurega, kiire kasvutempoga ja suure vastupanuvõimega saasteainetele (Torres jt, 2013). Wang jt (2013) on näiteks soovitanud biometaani tootmiseks kasutada *Spirulina sp* tänu oma suurele raku suurusele ja vastupidavusele eemaldamisprotsessis. Ent kui arvestada, et biogaasi puhul on eelkõige oluline biomassi tootlikkus, siis on hea vetikaliik *Chlorella vulgaris*, kes on suuteline sobivate tingimuste juuresolekul ka pimedas mõningal määral biomassi tootma (toitaineteks orgaaniline süsinik, nt glükoos) (Iwamoto, 2007; Chen jt, 2011). Mussgnug jt (2010) leidsid katsetulemusena, mil eeltötlusena kasutati kuivatamist, et näiteks rohevetikas *Chlamydomonas reinhardtii* oli efektiivsem liik biogaasi tootmiseks ehk suurema biogaasi tootlikkusega kui näiteks vetikaliik *Scenedesmus obliquus*. Kuna geenitehnoloogia areneb kiiresti, siis ideaalsete vetikaliikide leidmisel nähakse võimalust ka tootmisefektiivsust tõstvate omadustega geenmuundatud vetikaliikide väljatöötamisel vastavate protsesside ja saaduste tarbeks (Medipally jt, 2015).

Olenevalt kääritustingimustest, võib biogaasi tootmisel tekkida ka väärtuslikku kääritusjääki, mida võib kasutada nii loomasöödana, põllumajandusväetisena kui ka toitaine mikrovetikate kasvatamissüsteemis, seejuures on tekkinud orgaanilises väetises suurem osa toitaineid mineraliseerunud kujul, mis on taimedele kergemini omastatavad. Vedel digestaat on ühtlasi kasutatav mikrovetikate kasvatamiseks toitaine ressursina. (Wang jt, 2013) Lisaks on mikrovetikate biomassi võimalik siduda biogaasi põletamisel (ja puhastamisel) tekkiv CO₂, mida saab kasutada süsinikallikana.

Paraku on mikrovetikatel ka mõningaid puudusi, mis võivad takistada edukat anaeroobse lagunemisprotsessis toimumist (Ward jt, 2014). Nimelt on mikrovetikatel

kasvatamissüsteemis suhteliselt madal kontsentratsioon, mida vastava kogumistehnoloogiaga tuleb paksendada. Samuti mitte kõik mikrovetikad lagune hästi, sest mõnede liikide puhul sisaldavad rakuseinad hemitselluloosi ja ligniini ning seetõttu taluvad nad bakterite lagundamist ja suudavad pikemat aega säilida, mis võib põhjustab ebavõrdse metaani tootmise. Probleemi vältimiseks võib biomassi eeltöödelda (nt termiline või ultraheli töötlus) (Andersson jt, 2011), kuid tuleb arvestada, et süsteem tervikuna peab kasumit tootma. Võrreldes maismaataimedega on eelnevalt nimetatud raskestilagundatavate ainete sisaldus mikrovetikates siiski marginaalne, mis välistab vajaduse energiamahukate eeltötlusprotsesside järele enne anaeroobset lagundamist (Montingelli jt, 2015).

Puuduseks on ka mikrovetikate kõrge lämmastiku sisaldus, mis biogaasi toomisel ei võimalda optimaalset C/N/P suhet, milleks on 100...200/4/1 (Petrick jt, 2013). Geider ja La Roche (2002) on oma töös välja toonud mikrovetikate C/N/P suhteks 106/16/1, kuid olenevalt teostatud katsetest võib see varieeruda. C/N suhe alla 20 on anaeroobsete bakteritele lagundamiseks madal ning selline tasakaalustamatus põhjustab lagunemise käigus lämmastiku vabanemise ammoniaagi kujul, mis aga võib muutuda pärssivaks metanogeensete bakterite tegevuseks (Ward jt, 2014) ja takistada biogaasi tekkimist (Yen ja Brune, 2007; Salerno jt, 2009). See aga tingib edukaks biogaasi tootmiseks vajaduse kohaldada elukoosluste tingimusi käärítés (Petrick jt, 2013). Täiendavate substraatide leidmisel on oluline, et nad peavad olema madala lämmastiku ja fosfori ning kõrge süsiniku sisaldusega. Katseid on tehtud näiteks vanapaberi (Yen ja Brune, 2007), sojaoa õliga (Salerno jt, 2009), glütserooli (Ehimen jt, 2011) ja põhuga (Zhong jt, 2012; Vivekanand jt, 2012) — kõigi puhul täheldati kooskasutamisest tulenevat biogaasi tootlikkuse suurenemist. Kuid alati ei pruugi piisata ka õigest C/N suhtest, sest kui C või N pole omastatavad, võib tekkida energiapuudus ning protsessis ei vabane piisavalt soojust ja biogaasi tootmine on häiritud.

Biogaasi tootlikkust võib pärssida ka kõrge soolade sisaldus mikrovetikates, mis on eelkõige põhjustatud vetikamassi kasvatamisest suure soolsusega (mere)vees (Torres jt, 2013), kuid eriti piirab see digestaadi kasutamise võimalikkust. Lisaks inhibeerivad biogaasi tootlikkust tootmisprotsessi vältel akumuldeeruda võivad kaaliumühendid (Petrick jt, 2013), suurest lipiidide sisaldusest tingitud pika ahelaga ja lenduvad rasvhapped ning ka protsessis käigus eralduva vesiniksulfiidi kõrge kontsentratsioon (Montingelli jt, 2015).

1.4.3 Vetikakütuste tootmise majanduslikud aspektid

Mikrovetikatest kütuste tööstustootmiseks on vajalik üksikasjalik ülevaade vetikatehnoloogia teadus-, arendus- ja turundustegevusest, millega kaasneb põhjalik tehnoloogiate (sh logistika) ja protsesside uuring. Praegu esineb teatav ebakindlus ärieesmärkidel toodetava vetikakütuse tasuvuses, mis tuleneb mitmetest seni veel ebatäpsetest aspektidest vastavas uurimisvaldkonnas. Tootmisprotsessi paindlikkus ja tundmine on väga oluline, sest kui uuritavad tehnoloogiaprotsessid ei tooda kasumit, on vaja leida alternatiivseid võimalusi probleemide lahendamiseks. Majandusliku tasuvuse hindamisel on oluline arvestada ka tehnoloogia arendamisest tulenevat positiivset mõju keskkonnale. Ühtlasi on vajalik kursis olla valdkonda toetavate mehhanismidega (sh rahaliste toetustega), mis aitaksid kaasa vetikatehnoloogia edendamisele. (Darzins jt, 2010) Tavaliselt kasutatakse teadusuuringutes majandusliku tasuvuse prognoosimiseks olelusringi hindamist ja kuluanalüüsi, millede tulemused on küll pigem hüpoteetilised ega pruugi peegeldada reaalselt olukorda (Slade ja Bauen, 2013), kuid võimaldavad välja tuua kitsaskohad ja suunata edasisi teadusuuringuid.

Hetkel pole vetikakütuse tootmiskulud kaugeltki sarnased fossiilkütuste tootmiskuludega, mil tootmise majanduslik õigustatus on sõltuv petrooleumkütuste hindadest (Darzins jt, 2010). Küll on aga mikrovetikate kasvatamise sotsiaalseks ja keskkondlikuks tasuvuseks see, et nad ei võistle toidukultuuridega maa pärast ning lisaks seovad fotosünteesi käigus atmosfäärist CO₂-te orgaanilise aine koosseisu (Ward jt, 2014; Chen jt, 2015) ja ei vaja kasvuks taimekaitsevahendeid (Surendhiran ja Vijay, 2012). Veel ka tootmisprotsessi käigus lisaks kütusele endale saadavad kaasühendid ja saadused (nt digestaat) või ka muud kaashüved (protsessid) mõjutavad oluliselt majanduslikku elujõulisust ja vähendavad kulusid. Lisaks on võimalik kokku hoida, kui reovesi on nii toitainete allikas kui kasvukeskkond ning CO₂ ressursina kasutada biogaasi puhastamisest ja põletamisest pärinevat CO₂-te ja suitsugaase tööstusjaamadest. Ka on kasvukeskkonnana võimalik kasutada muid joogiks kõlbmatuid veeressursse, seejuures elektrijaamade jahutusvee kasutamise eeliseks on see, et ta nõuab vähem lisaenergiat vajaliku kasvutemperatuuri saavutamiseks. Ühtlasi võimaldab kasvuts vajalike ressursside lähedus kokku hoida transpordikuludelt. Seega, kuna teadlased pole siiski veel otseselt majanduslikku tasuvust ainuüksi mikrovetikatest biogaasi tootmisprotsessis näinud, kus peamiseks põhjusteks on kõrge kulu toitainetele, kallid eemaldustehnoloogia ja investeerimiskulud (Petrick jt, 2013), siis paljud uurimisrühmad keskenduvadki mikrovetikate kui lisaväärtuse kasutusvõimalustele uurimisele.

Kuna vetikad on siiski potentsiaalne substraat energia tootmiseks, siis on selge, et mikrovetikate kasutamise võimalikkust energiatööstuses on vaja uurida. Majandusliku perspektiivi hindamisel tuleb analüüsida nii valdkonna puudusi kui eeliseid ja seda iga asjaosalise seisukohast lähtuvalt, kes on tootmisesse kaasatud. Antud juhul on mikrovetikatest bioenergia tootmise valdkonda pärssivad takistused toormega seotud kogemuste vähesus, investeeringutega seotud ebamäärane tulu, toorme kasutamise potentsiaali või toormemahu ülehindamine ning ebakindel finantsiline toetus. Ettevõtlike arendaja seisukohast oleksid probleemideks vetikaenergia konkureerimine teiste bioenergia ja taastuvate energiaallikatega, toorme pakkujate vähesus (ressurssi tuleb ise toota), bioenergia tootval ettevõttel perspektiivi puudumine ning ebamäärased arenduse ja tegevuse maksumused. Ning takistused lõpptarbija seisukohast on energia kallim maksumus võrreldes fossiilkütuste maksumusega, vetikaenergia pakkumise võimalik piiratus (vaid hooajaline), teiste taastuvate energialiikide eelistamine bioenergiale, sh vetikaenergiale, ja kõikuv bioenergiaturg. (kohandatud Värnik jt, 2010 järgi)

Valdkonna arengut soodustavateks aspektideks on bioenergiaturu atraktiivsus, finantsilise toetuse olemasolu, riiklik reguleeritus ja toetusinstrumendid taastuvenergiale, fossiilkütuste kasutamise ja süsiniku emissiooni võimalik vähenemine, nähakse enamikele energiaturgudele sisenemise võimalust, bioenergia töötlemisvõimalus, energiatootmise hajutamine (sõltumatus ühest energiatootmise viisist), tegevusvaldkondade mitmekesistamine majanduses, biokütuse varustuskindluse suurendamine ja toorme valiku suurendamine bioenergia tootmiseks (ressursi mitmekesisus). (kohandatud Värnik jt, 2010 järgi)

Kuna paljud hiljutised uuringud viitavad sellele, et biogaasil on parem kasvuhoonegaaside ja energia varustuskindluse eelised kui vedelkütustel, siis arvestades seda ja eespool väljatoodud aspekte, võib biogaasi tootmine olla kõige praktilisem viis vetikatest energiat toota (Rösch jt, 2009; Wiley jt, 2011). Ühtlasi loetakse biogaasi tootmist anaeroobse lagunemise teel kõige otsemaks viisiks mikrovetikatest energia saamiseks (Rösch jt, 2009; Montingelli jt, 2015). Kuigi praegu pole majanduslik tasuvus end veel tõestanud, on uuringud näidanud, et vetikakütuste tootmine tööstusskaalal on suhteliselt lähedal majanduslikule teostatavusele (Norsker jt, 2011) ning seda aitaks saavutada tootmistehnoloogiate efektiivsuse arendamine ja jooksevkulude vähendamine (Acién jt, 2012).

2 MATERJAL JA METOODIKA

Käesoleva magistritöö strateegia põhineb teostatavuse ja tasuvuse analüüsil, mis koosneb nii kirjandusanalüüsist kui ka andmeanalüüsist. Metoodilise lähenemise eesmärgiks on uurida sügavuti fotoautotroofsete mikrovetikate kasvatamise kriitilisemaid tegureid Eestis ning hinnata vetikakultuuri kasvatamise tasuvust integreeritud süsteemitingimustes, mil tööstustootmise lõpp-produktiks on biogaas. Analüüsi tulemuste omavaheliste seoste abil uuritakse, kas ja kuidas on kõige otstarbekam mikrovetikatest biogaasi toota Eesti tingimustes. Kuna fotoautotroofsed mikrovetikad vajavad kasvamiseks valgust, CO₂-te, muid toitaineid ja vett, siis hinnatakse eelkõige neid parameetreid. Ühtlasi on need tegurid määravaks kasvatamise ajalise perioodi ja asukoha valikul.

Mikrovetikate kasvatamise ja neist biogaasi tootmise tasuvuse hindamiseks kasutatakse teadusartikleid ScienceDirect andmebaasist ning teiste aruannete ja muude kirjanduslike väljaannete andmeid. Arvutused, tabelid ja graafikud teostatakse kasutades Microsoft Office Excel 2010 programmi ning kasutatud parameetrid tuuakse täpsemalt välja lisas 1. Järgnevalt antakse aga täpsem ülevaade lähteandmetest ja metoodikast.

2.1 Eesti valgusrežiimi ja temperatuuri pikaajaline aastane käik

Kuna fotoautotroofsete mikrovetikate jaoks on vajalik valgusallika olemasolu ning kasvatamine vaid loomuliku päikesevalguse tingimustes võimaldab tootmiskuludelt kokku hoida, siis analüüsitakse Eesti pikaajalist päikesevalguse jaotumist ja muutlikkust. Ning kuna vetikate kasvu soodustab ka soe temperatuur (vt ptk 1.1.1), siis analüüsitakse veel ka Eesti õhutemperatuuri aastast käiku.

Eesti päikesekiirguse hulga, päikesepaiste kestuse ja keskmise õhutemperatuuri andmed on tellitud Keskkonnaagentuuri (KAUR) Riigi Ilmateenistusest. Andmevalimi moodustamise eelduseks oli valitud meteoroloogiliste parameetrite võimalikult kaasaegne pikaajaline andmerida ning kattuvad meteojaamad. Andmeanalüüsiks kasutati 10 aastast andmerida, andmestikku aastast 2005-2014.

Eesti kliimaparameetrite analüüsimiseks vajalik andmestik pärineb järgmistest jaamadest:

- päikesekiirguse hulka mõõtvad jaamad: Tallinn-Harku, Pärnu-Sauga, Tartu-Tõravere, Tiirikoja, Vilsandi ja Narva (kuni 19.12.2013 mõõdeti Narva-Jõesuus, edasi Narva lennujaamas);

- päikesepaiste kestust mõõtvad jaamad: Tallinn-Harku, Pärnu-Sauga, Tartu-Tõravere, Tiirikoja, Vilsandi, Kuusiku ja Võru;
- õhutemperatuuri mõõtvad jaamad: Tallinn-Harku, Pärnu-Sauga, Tartu-Tõravere, Tiirikoja, Vilsandi, Narva (Narva-Jõesuu kuni 2012, edasi Narva-Olgino) ja Kuusiku.

2.2 Mikrovetikate kasvatamise kuluanalüüs

Iga ärieesmärgil kavandatava tootmise korral on vaja tõestusi tehnoloogia tasuvusest, mille hindamiseks kasutatakse lisaks olelusringi hindamise ja tasuvusanalüüsi kõrval tihti ka kuluanalüüsi. Sedasi võimaldatakse prognoosida ja analüüsida tootmisahela etappe ja maksumuse kulukust, aidates seejuures välja selgitada tootmise suuremad kuluartiklid.

Kuna Eestis mikrovetikate kasvatamist tööstuslikuks tootmiseks veel ei toimu, siis ei võimalda see teha klassikalist tasuvusarvutust reaalsete kulude põhjal ning adekvaatselt hinnata konkreetse toodetava mikrovetikamassi omahinda. Seega koostatakse kuluanalüüs, millega leitakse hinnanguline mikrovetikate tootmishind.

Kuluanalüüsi koostamisel valiti võrreldavateks kasvatamissüsteemideks kirjanduses enim käsitlemist leidvad reaktorid nagu ringvoolukanal, torujas fotobioreaktor ja plaatjas fotobioreaktor. Erinevates süsteemides kasvatatavate mikrovetikate tootmishinna väljaarvutamiseks ning kasvatamissüsteemide analüüsimiseks kasutatakse erinevaid olelusringi hindamisel, majandus-tehnilistel analüüsidel ja kuluanalüüsidel põhinevaid teadusuuringuid ning muid kirjandusallikaid ja nende andmeid.

Mikrovetikate tootmishinna prognoosimiseks kasutatakse kuluanalüüsi meetodit, mis võimaldab välja selgitada ka enim maksvust nõudvad tootmisetapid, sh selleks vajaminevad seadmed ja protsessid. Peamised maksumuse hindamisetapid on põhivara kulu, muud kapitalikulud ning muutuvkulud. Tootmise kogukulu leitakse põhivara ja otseste tootmiskulude summana.

Otsesed tootmiskulud sisaldavad kulutusi toorainele, kommunaalkulusid, tööjõu ja hoolduse kulusid. Et määrata otsest tootmishinda, on vajalik teada eelkõige tooraine, elektri, vee ja tööjõu maksumust, teisi kulusid saab arvutada kasutades vastavat protsentuaalset hinnangut. Vajaliku tooraine koguse saab arvutada tootmisvoogude põhjal ning kommunaalkulud on leitavad protsessis kasutava elektri ja vee koguse alusel. Tooraine maksumus peab sisaldama ka transporti vajalike rajatisteni ning elektrikulu tuleneb seadmete võimsusest ja tarbimisajast. Veekulu sõltub selle kvaliteedist ja kasutatavast mahust. Ühtlasi on võimalik

nii toitainete kui veekulu kokku arvestada toitelahuse kuluna. Lisaks kaasneb veekasutusega ka elektrienergia kulu: kasvatamissüsteemis vee liigutamine ning sisse- ja väljapumpamine. Tööjõud hõlmab inimtööjõudu, mis on vajalik protsesside nõuetekohase toimimise korraldamiseks. Hooldus arvutatakse põhinedes personali arvul ja nende töötasul. (Acién jt, 2012; Acién jt, 2014) Kõik kulud arvutatakse 1 kg vetikamassi põhiselt ning elueaks võetakse hinnanguliselt 30 aastat.

2.3 Mikrovetikate kasvatamine integreeritud süsteemitingimustes

Kirjandusanalüüsi tulemusena selgus, et mikrovetikate kasvatamine on eelkõige kasulik, kui kasvuks vajalikke ressursse saaks kasutada tööstuse jäätmevoogudest ning kasvatamise sidumine juba toimiva tootmiskompleksiga võimaldaks kasutada ka olemasolevat infrastruktuuri. Seetõttu valiti näidisjaamaks Tartu veepuhastusjaam, kus arendatakse integreeritud tehnoloogilist kompleksi innovaatiliste ja säästvate lahendustega — reovee puhastamine ja reoveesetest kui põhisubstraadist biogaasi tootmine.

Kasutades ülevaateosas väljatoodud kirjeldusi ja andmeid kirjandusest, analüüsitakse mikrovetikate kasvatamist integreerituna tööstustootmise kompleksi, mille jäätmevoogudest pärinevat CO₂-te saaks ära kasutada süsinikallikana ning reovett saaks kasutada nii kasvu- kui ka toitekeskkonnana.

Tartu veepuhastus- ja biogaasijaama tehnilised näitajad on saadud kirjavahetuse teel AS Tartu Veevärk reoveepuhasti juhatajalt.

- Veepuhastusjaamas on alates 2013. aasta lõpust alates alustatud reoveesetest biogaasi tootmist. Eeldatavaks settekoguseks on 206 m³/päevas, kuivainesisaldusega 6%. Seejuures oodatav päevane maksimaalne biogaasi toodang oleks umbes 3800 m³. Et maksimeerida gaasitoodangut, on lisaks reoveesetele võimalik kasutada umbes 10% ulatuses muid jäätmeid.
- Reovee toitainete sisaldus ja päevane vooluhulk on muutuvad suurused. Tartu veepuhastusjaama sissevoolus on lämmastiku sisaldus 70-150 mg/l ja fosfori sisaldus 8-40 mg/l ning keskmine päevane pealevool praegusel ajal on ligikaudu 17000 m³ (2014. aasta reovee päevaste pealevoolude andmete analüüsi põhjal).

Kuna mikrovetikad on võimelised siduma suitsugaasidest CO₂-te, vetikamassist on võimalik toota biogaasi ning kasvatamine reovees võimaldab siduda kasvuks vajalikke toitaineid ja

saada ühtlasi puhastatud heitvett, siis kõiki neid aspekte hinnatakse Tartu reoveepuhastus- ja biogaasijaama näitel.

Biogaasi tootlikkuse hindamisel arvestatakse, et 1 kg vetikamassist on võimalik toota 0,5 m³ biogaasi (Zamalloa jt, 2011; Craggs jt, 2013; Torres jt, 2013). Arvutused teostatakse ühe päeva lõikes ja 180 päeva jooksul, mis on külma kliima tingimustes mikrovetikate kasvatamiseks eeldatavasti kõige ökonoomsem lahendus. Lisaks arvutatakse süsteemi seotud CO₂ ja selle tulemusena kokkuhoitava emissiooni kulu aastas (kokkuhoid saastetasudelt).

Kuna 1 tonni vetikamassi tootmisel on võimalik käidelda rohkem kui 1400 m³ heitvett (Feng jt, 2011), siis hinnatakse ka võimalikust kasvatatavast vetikakogusest tulenevat reovee puhastamise kasulikkust. Ühtlasi hinnatakse ka mikrovetikate kasvatamisest tulenevat reoveepuhastamise kasulikkust rahalises väärtuses, mil puhastatud heitvee maksumuse aluseks võetakse AS Tartu Veevärgi turuhind heitvee ärajuhtimise eest. Kuigi käitlemise omahind tuleks odavam, siis hinnangu andmiseks on turuhinnaks võetud I grupi (elanikkonna olmereovee) heitvee ärajuhtimise teenuse hind 1,08€ (hind ilma käibemaksuta) (Tartu Veevärk, 2015). Ettevõtte reovee puhastuse omahind võiks aga hinnanguliselt olla 50% võrra väiksem.

3 TULEMUSED JA ARUTELU

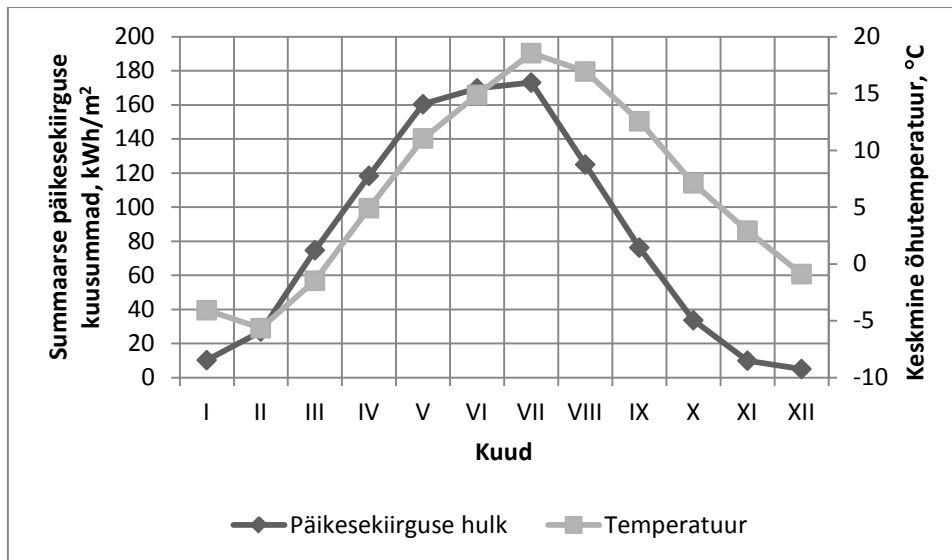
Kliima tingimused, süsihappegaasi ja muude toitainete (N ja P) ning veeressursside kättesaadavus mõjutavad oluliselt fotoautotroofsete mikrovetikate tootlikkust ja sellest lähtuvalt vetikakütuste tootmise majanduslikku edukust.

3.1 Eesti valgusrežiimi ja temperatuuri pikaajaline aastane käik

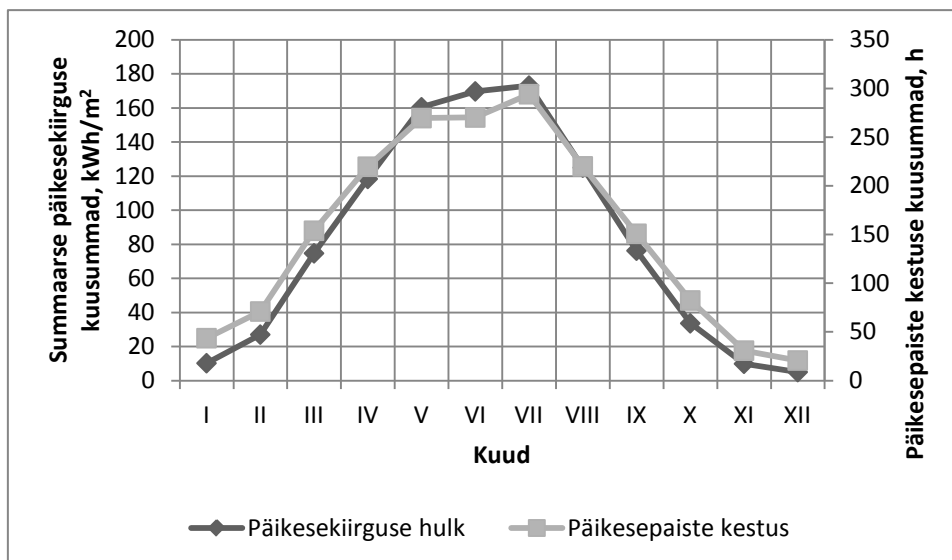
Mikrovetikate kasvatamise edukust ja majanduslikku tasuvust mõjutavad suuresti kliimaatilised tingimused. Kasvatamine looduslikest tingimustest lähtuvalt võimaldab kasvatamiskulud võimalikult madalana hoida, kuid kasvatamiseks vajalikud optimaalsed parameetrid on saavutatavad vaid sooja kliimaga piirkondades. Eesti geograafilisest asendist tingituna jääb parasvöötme piirkonda, kus aastaegade vaheldumisest tingituna esineb suur kliimaparameetrite muutlikkus aastas jooksul. Optimaalsest madalamad kliimaparameetrite väärtused muudavad ka tootmise kallimaks, sest efektiivsete kasvutingimuste saavutamiseks ja tootlikkuse suurendamiseks on vajalik täiendavat energiat.

Kuna kliimafaktorid nagu päikesevalgus ja temperatuur mõjutavad oluliselt fotoautotroofsete mikrovetikate fotosünteesi läbiviimise ja kasvukeskkonna tingimusi, siis analüüsi vastavaid parameetreid Eesti kontekstist lähtuvalt. Olenevalt aga geograafilisest piirkonnast või ka konkreetsest kohast, võivad nende parameetrite mõõtmistulemused varieeruda, kuid Eesti üldise kliima analüüsimiseks ja iseloomustamiseks leiti meetodika peatükis (ptk 2.1) väljatoodud kõigi meteojaamade koondkeskmised andmed vastavalt igale parameetrile perioodil 2005-2014.

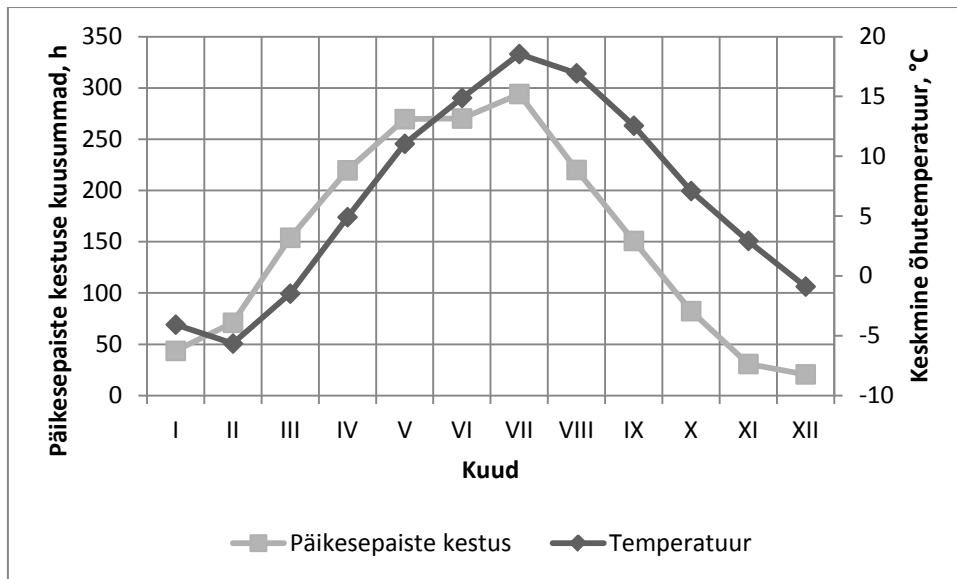
Järgnevatel joonistel (Joonis 6; Joonis 7; Joonis 8) on esitatud Eesti päikesekiirguse hulga ja päikesepaiste kestuse keskmised kuusummad ning keskmised õhutemperatuurid perioodil 2005-2014. Nende tulemuste alusel on leitud ka päikesekiirguse hulga ja päikesepaiste kestuse ligikaudsed keskmised päevased näitajad kuusumma jagamisel iga kuu päevade arvuga (Joonis 9). Paremaks analüüsi teostamiseks on parameetreid paariti võrreldud (parameetrid kahel vertikaalteljel) ning viimasel joonisel on võrreldud kõiki kolme parameetrit korruga keskmiste päevaste näitajate alusel (Joonis 9).



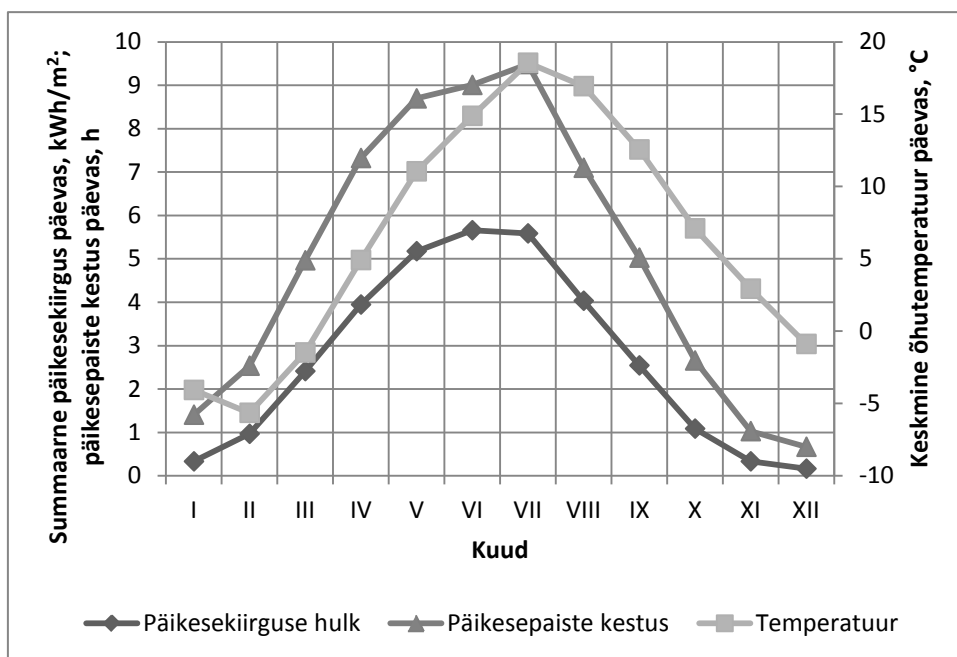
Joonis 6. Eesti summaarse päikesekiirguse kuusummad (kWh/m²) ja keskmine õhutemperatuur (°C) perioodil 2005-2014.



Joonis 7. Eesti summaarse päikesekiirguse kuusummad (kWh/m²) ja päikesepaiste kestuse (h) kuusummad perioodil 2005-2014.



Joonis 8. Eesti päikesepaiste kestuse kuusummad (h) ja keskmine õhutemperatuur (°C) perioodil 2005-2014.



Joonis 9. Päevane summaarne päikesekiirgus (kWh/m²), päikesepaiste kestus (h) ja keskmine õhutemperatuur (°C) perioodil 2005-2014.

Joonistel 6-9 esitatud kõiki parameetreid iseloomustab suur aastane muutlikkus. Aasta jooksul varieerub päevane päikesepaiste kestus 0,7 tundi detsembris kuni 9,5 tunnini juulis ning seega külmematel kuudel on päikesepaistel aega vähem kui soojematel kuudel. Summaarne päikesekiirgus hulk Eestis on aastas ligikaudu 983 kWh/m², kuid mikrovetikate kasvuks oleks optimaalne kui päikesekiirgus hulk ligikaudu 1500 kWh/m². Aasta jooksul

varieerub päevane päikesekiirguse hulk $0,2 \text{ kWh/m}^2$ detsembris kuni $5,7 \text{ kWh/m}^2$ juunis. Selline päevase päikesepaistelise aja kestuse suur erinevus aasta lõikes ja saadav vähene päikesekiirguse hulk pole kõige soodsam mikrovetikate kasvuks ning mõjub vetikakasvu takistavalt. Kuid võrreldes vastavaid parameetreid Rootsi kliimafaktoritega, mida on kajastanud Andersson jt (2011) oma töös, siis on need võrdlemisi sarnased. Rootsis varieerub päevane summaarne päikesekiirgus aasta jooksul $0,3 \text{ kWh/m}^2$ detsembris kuni $5,7 \text{ kWh/m}^2$ juunis ning päevane päikesepaiste kestus 1,2 tunnist detsembris kuni 8,9 tunnini juunis. Erinevalt Eestist on aga Rootsis, kuigi tegemist on samuti külma kliima riigiga, vetikatehnoloogiale aga järjest suuremat tähelepanu hakatud pöörama ning eeskätt reoveepuhastuse valdkonnas (Andersson jt, 2011; Krustok jt, 2012; Olsson jt, 2013). Samuti tegeletakse ka Soomes vetikatehnoloogia arendamisega ning Arnold (2013) on välja toonud, et Lõuna-Soomes on piisavalt loomulikku valgust, et vetikaid veebruarist oktoobrini kasvatada ning seega võib eeldada, et mikrovetikate kasvatamiseks on sama head valgustingimused (või isegi paremaid) ka Eestis.

Kuna õhutemperatuur mõjutab ka mikrovetikate kasvukeskkonna temperatuuri, siis analüüsiti Eesti õhutemperatuuri aastast muutlikkust. Andmeanalüüsi tulemusena saadi, et Eesti keskmine õhutemperatuur on aastas ligikaudu $6,4^\circ\text{C}$ ning kuude keskmine temperatuur varieerub $-5,7^\circ\text{C}$ -st veebruaris kuni $18,5^\circ\text{C}$ -ni juulis. Kuna mikrovetikaid kasvatatakse aga vesikeskkonnas, siis on nad õhutemperatuuri kõikumiste suhtes vähem tundlikud kui maismaataimed (Darzins jt, 2010).

Üldiselt peetakse aga temperatuuri 15°C kasvatamise alumiseks piiriks, mis pakuks mikrovetikatele veel soodsaid kasvutingimusi ja seega kõrgemat produktsiooni (Andersson jt, 2011). Ühtlasi tähendab see seda, et aastaringsel kasvatamisel peaks ka kõige külmemate kuude õhutemperatuur olema vähemalt 15°C (Darzins jt, 2010). Seetõttu Eesti keskmine õhutemperatuur jääb madalaks, et mikrovetikaid efektiivselt aastaringselt kasvatada. Suvekuudel, juuni kuni august, sellega probleemi poleks ja vajalik temperatuur on saavutatav. Pikemal perioodil mai kuni oktoober oleks keskmine õhutemperatuur ligikaudu $13,5^\circ\text{C}$, mis on üpris lähedal 15°C -le. Kuid arvestades, et oktoobris on päikesekiirguse ja päikesepaistelise aja kestus juba võrdlemisi madal, vastavalt $1,2 \text{ kWh/m}^2$ ning 2,3 tundi päevas, siis sobiks kasvuperioodiks aprill kuni september. Kuna päikesepaiste kestus on olulisem ka kui päikesekiirguse hulk, siis võrreldes aprilli ja oktoobri päikesepaiste kestust, on aprillis see umbes 4,6 h võrra pikem päevas kui oktoobris. Vastava perioodi, aprill kuni september, keskmine õhutemperatuur oleks sel puhul $13,1^\circ\text{C}$, mis on samuti päris lähedane 15°C -le.

Seega arvestades Eesti analüüsitud kliimaparameetrite tulemusi ning võttes arvesse ka teiste külma kliima riikide uurimistulemusi, siis võib eeldada, et mikrovetikate (monokultuurina) kasvatamiseks sobib eelkõige aasta soojem periood — aprill kuni september (ligikaudu 180 päeva aastast).

Aastaringseks tootmiseks oleks vaja kasvatamissüsteemid väliskeskkonnast eraldada kasvuhoone tüüpi rajatisega, mis võimaldaks kütmist külmemal poolaastal (Wang jt, 2013). Üldiselt aitaks kasvuhoone ka üldiselt vältida kehvade ilmaolude mõju ning võimaldaks (soojemal poolaastal) lihtsamini saavutada kasvatamiseks vajalikku kõrgemat temperatuuri. Vajalik kasvutemperatuur efektiivseks vetikakultuuri toomiseks oleks saavutatav ka, kui kasvatamine toimuks tööstustootmiste lähedal, mis võimaldaks ära kasutada tööstuse jääksoojust. Lisaks vajaliku temperatuuri säilitamisele, tuleb aastaringse vetikatootmise puhul kasutada lisavalgust pimedal ajal. Tootmiskulude suurenemise tõttu võiks aga kunstlikku valgust vältida ja püüda maksimaalselt kasutada päikesevalgust (Blanken jt, 2013). Üldiselt oleks vajalik Eesti kontekstist lähtuvalt ka, et uurimisrühmad suunaksid tähelepanu siinsetesse kliimatingimustesse sobilike vetikatüvede otsimisele. Vajalik oleks leida külmalembeseid tüvesid, mis oleksid vähem tundlikud madalate temperatuuride suhtes ning oleksid ühtlasi leplikud madalama päikesevalguse osas, kuid samas peaks produktiivsus olema piisavalt suur, et tasuks ära nende masstootmine.

3.2 Mikrovetikate kasvatamise kuluanalüüs

Kuluanalüüsi tulemusena arvatati kolmes erinevas süsteemis kasvatatavate mikrovetikate tootmishind ning sellele lisaks leiti vetikamassi hind, kui tootmine peaks toimuma kasvuhoones ning koos kütmisega külmemal poolaastal (Tabel 2). Sedasi on esialgne biomassi hind võrdsustatav olukorraga, kui vetikaid peaks kasvatatama vaid 180 päeval aastas ehk soojemal poolaastal ning mis on võrreldav aastaringse kasvatamisega, mil kasvuhoonetingimustes tootmine nõuab lisaenergiat ja kergitab tootmishinda. Kõik kulud on esitatud eurodes (€) ühe kilogrammi (kg) kuiva vetikamassi (KA) kohta (Tabel 2).

Arvestades Eesti tingimustes maressursside võimalikkust ja võimalike kasutatavate alade terviklikkust, siis otstarbekuse mõttes on võrreldud vetikate tootmist vaid 1 ha suurusel alal. Nagu ka Hollandi uurimisrühm (Schot ja Stijkel, 2014) on välja toonud, et kui mikrovetikate kasvatamine on eksperimentaalses etapis, siis ei soovitata mastaapsete süsteemide rajamisega kõigepealt alustada. Kui väikesemahuline süsteem töötab piisavalt efektiivselt, alles siis on otstarbekam laieneda. Sedasi välditakse ka suuremaid riske ja ebaõnnestumisi.

Tabel 2. Mikrovetikate biomassi hind kolme erineva kasvatamissüsteemi korral ja kasvuhoone tingimustes.

	Ringvoolukanal	Toruja fotobioreaktor	Plaatjas fotobioreaktor
	€/kg KA 1 ha	€/kg KA 1 ha	€/kg KA 1 ha
<i>Põhiseadmed+elekter</i>			
PVC kate maapinnale	0,49		
Terasest tugiraamistik			0,12
Toitelahuse valmistamissüsteem	0,81	0,29	0,19
Elekter	0,07	0,02	0,01
Kultuuri segamispump		0,74	
Elekter		0,85	
Rootor/gaasipuhur (vetikamassi liigutamiseks)	0,05	0,07	0,74
Elekter	0,06	0,10	4,33
Tsentrifuug (vetikamassi kasvukeskkonnast eraldamise süsteem)	1,19	0,43	0,39
Elekter	0,31	0,07	0,05
Kogumismahutid	0,25	0,06	0,04
<i>Muud kapitalikulud</i>			
Installatsioon	0,42	0,48	0,44
Aparatuuri kulud (mõõtmiseseadmed jm)	0,28	0,16	0,15
Torustik	0,84	0,48	0,44
Rajatised	0,84	0,48	0,44
<i>Muutuvkulud</i>			
Polüetüleentoru/-plaat		0,13	0,10
Toitelahus	0,44	0,44	0,44
CO ₂	0,34	0,34	0,34
Toitelahuse filtrid	0,44	0,18	0,14
Tööjõukulud	3,54	1,82	1,16
Hooldus	0,43	0,49	0,45
TOOTMISHIND	10,79	7,62	9,96
<i>Kasvuhoone</i>			
Elekter	0,38	0,19	0,12
Installatsioon	0,46	0,24	0,15
Hooldus	0,06	0,03	0,02
TOOTMISHIND	13,23	8,87	10,77
<i>Kasvuhoone kütmine (185 päeva/a)</i>	5,00	2,56	1,64
<i>TOOTMISHIND KOKKU</i>	18,23	11,43	12,41

Kuluanalüüsi tulemusena leiti, et 1 kg mikrovetikate tootmishind tuleb odavam fotobioreaktorites kasvatamise korral. Fotobioreaktorites on ka mikrovetikate tootmis- ja kasvatamiskulud umbes 2-3 korda suurem kui ringvoolukanalis. Tootmishinna väljaarvutamise tulemusena

saadi 1 kg vetikakultuuri hinnaks ringvoolukanalis 10,79€ torujas fotobioreaktoris 7,62€ ning plaatjas fotobioreaktoris 9,96€ Võttes arvesse aga Eesti kliimaatilisi tingimusi, mil külmemal perioodil oleks vajalik kasvuhoonetüüpi rajatise kasvatamine koos kütmisega, siis rajatise maksumus ja kütmine kergitavad mikrovetikate tootmishinda. Seega kui mikrovetikaid kasvatatakse kasvuhoones ja 185 päeval aastast toimub kütmine, siis tootmishinnaks 1 kg vetikamassi kohta tuleb ringvoolukanali süsteemis kasvatatuna 18,23€ torujas fotobioreaktoris 11,43€ ning plaatjas fotobioreaktoris 12,41€

Suur hinnaerinevus esineb ringvoolukanali kasvatamissüsteemi puhul, mil kasvuhoone lisalahendusena ja kütmine tõstavad kasvatamishinda 7,44€ võrra. Teiste süsteemide puhul väga suurt hinnatõusu ei esine. Toruja fotobioreaktori puhul tõuseks 1 kg vetikamassi tootmishind 3,81€ ning plaatja fotobioreaktori puhul oleks tootmishinna tõus väiksem, vastavalt 2,45€ Väiksem hinnatõus tuleneb eelkõige suuremast mikrovetikate produktsioonist plaatja kujuga fotobioreaktoris (64 t/ha/a) võrreldes ringvoolukanalis (21 t/ha/a) ja torujas fotobioreaktoris (41 t/ha/a) kasvatatavate vetikate tootlikkusega. Vastavatest tulemustest seega ka selgub, et kasvuhoone kütmine avaldab väga suurt mõju vetikamassi tootmishinnale.

Kütmisest tulenevaid kulusi oleks võimalik umbes 20% võrra vähendada, juhul kui mikrovetikate kasvatamine toimuks 330 päeva jooksul aastast ning kasvuhoone kütmine toimuks sellest vaid 150 päeval. Seega aasta kõige külmem kuu võiks jääda tootmissüsteemide ja tootmiskompleksi hooldusperioodiks. Sellist lähenemist, mil kasvatamisperioodiks on määratud 330 päeva aastast, on kasutanud ka mitmed teised uurimistöõde autorid (Davis jt, 2011; Zamalloa jt, 2011; Wang jt, 2013; Richardson jt, 2014)

Nagu ka meetodikas sai välja toodud, siis kuluanalüüs võimaldab välja selgitada ka kõige kulukamad tootmisprotsessid. Kõige suuremaks kuluartikliks avatud süsteemi puhul on kasvatamissüsteemist biomassi eemaldamisega kaasnevad kulud (tsentrifuugimine) ja töötajatele palgakulu. Toruja fotobioreaktori korral nõuab palju energiat ja investeeringut mikrovetikate segamissüsteem ja selle töõshoid ning plaatja fotobioreaktori puhul on kõige kulunõudvamaks vetikamassi liigutamiseks vajaliku gaasipuhuri maksumus ja gaasiga läbimullitamine. Tulemused ühtivad ka Slade ja Bauen (2013) uurimuses väljatooduga, et enamasti tulenevad ringvoolukanalites kasvatatavate mikrovetikate enamus tootmiskulusid tegevuskuludest (tööjõud, kommunaalkulud ja toormaterjal) ning fotobioreaktorite puhul põhjustab kõrgema tootmishinna peamiselt kapitalikulud.

Saadud mikrovetikate tootmishinna tulemusi pole õige üks-ühele võrrelda teiste sellelaadsete uuringutulemustega, kuna iga uuringu arvutusmetoodika võib olla erinevatel eeldustel üles ehitatud. Ühtlasi põhineb käesolevas töös leitud tootmishind vaid kuludel ja pole arvestatud tulutoovaid parameetreid. Väga vastakaid tulemusi on ka selle kohta, kumb süsteem on odavam, kas avatud süsteemid või fotobioreaktorid. Antud töö tulemusena, kuid ka näiteks teiste uuringute tulemusena on selgunud, et odavam tuleks tootmishind kui kasutada fotobioreaktoreid. Kuid näiteks Slade ja Bauen (2013) jõudsid oma uurimistööga järeldusele, et avatud tiikides tuleb mikrovetikate kasvatamine odavam: ringvoolukanalis kasvatatavate mikrovetikate tootmishind tuli põhistsenaariumi korra ligikaudu 2€/kg, kuid fotobioreaktorite puhul ligikaudu 10€/kg. Taoliste tulemusteni jõuti ka AquaFUELS (2011) töös. Alabi jt (2009) on saanud ringvoolukanalis mikrovetikate kasvatamishinnaks 12,75€/kg (1\$=0,88€) ja fotobioreaktoris 21,72€/kg. Acién jt (2012) said uurimustöö tulemusena torujas fotobioreaktoris kasvatatud mikrovetikate kuiva massi hinnaks suisa 69€/kg. Vastavad hinnad iseloomustavad aga ka mastaapsemaid tootmisi, alates 100 ha ja suuremad, ning seega pole võrreldavad antud töö tulemustega. Ent siiski ka nt Acién jt (2012) ning mitmed teised uurimisrühmad jõuavad järeldusele, et fotobioreaktorid on efektiivsemad süsteemid, kuid tuleks leida lahendusi kapitalikulude vähendamiseks (Chisti, 2007; Norsker jt, 2011).

On ka tõenäoline, et kulude modelleerimise mudelitega tegelikult alahinnatakse vetikate tootmist. Seda seetõttu, et neis prognoositakse üldisemaid ja suuremaid kuluartikleid, kuid reaalne projekt vajab detailsemat esitust ja kuluartikleid võib olla enamgi. Antud töö kuluanalüüsi tulemused näitavad ka, et mikrovetikate biomassi tootmishind on kallim kui muu Eestis kasutusel olev biomass energia tootmiseks. On aga tõenäoline, et süsteemi kapitalikulused tuleks ja saaks märkimisväärselt vähendada. Kuna kuluanalüüs väljendab vaid tootmise kulusid, siis pole omahinna arvutustes arvesse võetud toetavaid aspekte, mis võimaldaksid hinda alandada.

Üldiselt oleks mikrovetikate kasvatamise kulusid võimalik vähendada, kui kasvatamine toimuks suuremat produktiivsust soodustavates päikesepaistelises piirkondades (fotosüntees efektiivsem), kasutatakse efektiivselt seadmeid, energiat ja tööjõudu ning kõige tõhusamaid reaktoreid. Kuna kasvatamiskulud on ka liigispetsiifilised, siis tuleks leida võimalikult kõrge produktiivsusega vetikaliigid, mis oleksid ühtlasi sobivad vastavalt mikrovetikatest toodetavale lõppsaadusele. Lisaks on kulude vähendamisel oluline tehnoloogiate ja protsesside arendamine ning tuleks rakendada teisigi biotehnoloogilisi võtteid: oluline kulukokkuhoid on saavutatav juba siis, kui suudetakse CO₂, toitainete ja vee kasutamise pealt

kokku hoida, kasutades näiteks tootmisprotsesside jääke, mis muidugi limiteerib tootmisalade valikuvõimalust (Slade ja Bauen, 2013). Kuid mikrovetikate kasvatamissüsteemi sidumine mõne tööstuskompleksiga võimaldaks lisaks kasvuressursside odavale kättesaadavusele ära kasutada ka olemasolevat infrastruktuuri. Lisaks on ärieesmärkidel planeeritava tootmissüsteemi korral oluline käsitleda energiakasutuse optimeerimisega seotud aspekte (Slade ja Bauen, 2013), sest vetikate kasvatamine nõuab mitmeid energiamahukaid protsesse. Tootmishind tuleks madalam ka kui analüüsi kaasata bioenergia valdkonda arendamist soodustavate toetuste mehhanism. Et arvesse võtta ka säästvaid ja omahinda alandavaid aspekte, selleks oleks vajalikud edaspidised täpsemad uuringud vetikatehnoloogia kohta ning kaasata tuleks eksperte erinevatest teadusvaldkondadest. Lisaks oleks ka kuluanalüüsi jätkuks võimalik teostada tundlikkuse ja vajadusel ka riski analüüs, mis lihtsustaks suuremahuliste ja kulukate otsuste puhul parima lahenduse leidmist ja valikut.

Praegu võib öelda, et vetikakütused on veel arendus- ja väljatöötamisfaasis ja seepärast kallid võrreldes fossiilsete kütustega. Seega tuleb ületada mitmeid kitsaskohti ja leida multidistsiplinaarseid lahendusi. Ühtlasi töötavad teadusrühmad väga aktiivselt, et leida puuduolev informatsioon ka reaktorite kohta ja töötada välja uusi insenertehnilisi lahendusi. Kuigi praegu pole veel leitud, et mikrovetikate kasvatamine monokultuurina energia tootmise eesmärgil on majanduslikult edukas, siis tegelikult võib senist vetikatehnoloogia edenemise käiku pidada normaalseks. Sest tegelikult nii nagu enamiku võõra ja uudse puhul, siis võib eeldada, et ka vetikatehnoloogia arengu puhul läheb kõik esialgu suurte kahtluste ja isegi vastuseisuga, kuid tegelikult osutub tehnoloogiate taoline areng päris tavaliseks.

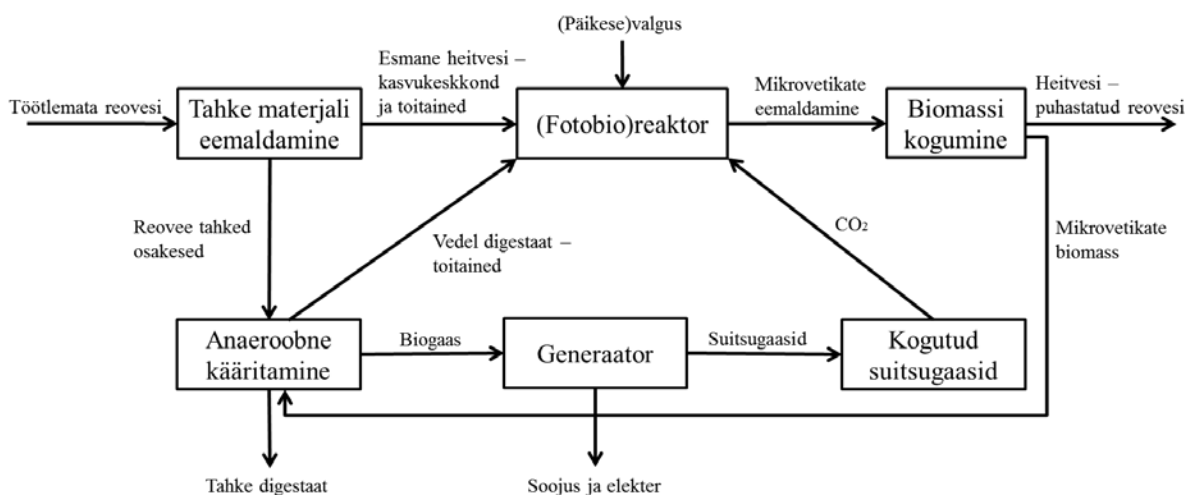
3.3 Mikrovetikate kasvatamine integreeritud süsteemitingimustes

Ülevaateosa ja teaduskirjanduse analüüsi tulemusena selgus, et ainuüksi mikrovetikatest biokütuste tootmine pole end seni veel ära tasunud ja paljud uurimisrühmad uurivad mikrovetikaid kui pigem lisaväärtust, mis alandab tööstustootmises käituskulusid, juhul kui kasvatamine integreerida kompleksi süsteemi. Parim lahendus oleks, kui mikrovetikate kasvuks vajalikud ressursid oleksid kõik kohapeal kättesaadavad.

Üheks alternatiivseks võimaluseks on mikrovetikate kasvatamine reoveepuhastusjaamades, kus nad saaksid reoveest omastada vajalikke toitaineid ning teisalt puhastaksid nad juba ka reovett. Ning kuna paljudes suurtes reoveepuhastusjaamades on olemas võimalused ka reoveesette (ja muude jäätmete) anaeroobseks lagundamiseks, siis biogaasi põletamisel eralduvast suitsugaasist või ka biogaasi puhastusprotsessist on mikrovetikatel võimalik

siduda eluks vajalikku CO₂-te. Lisaks on võimalik toodetud biomass ka ise energia tootmisesse suunata. Seega on võimalik mikrovetikatest energia tootmisel investeerimiskuludelt kokku hoida ehk selline integreeritud kompleks vetikate kasvatamiseks ei nõua eraldiseisva biogaasijaama rajamist ja biomass on koos teiste substraatidega otse suunatav anaeroobsesse lagunemisprotsessi. Ka on mikrovetikate ja reoveesette koos lagundamisel võimalik suurendada saadava biogaasi kogust (Olsson jt, 2013) ehk suureneks biogaasi kogus, mida substraatide eraldi lagundamisega saada ei oleks võimalik.

Kirjandusanalüüsi tulemustest lähtuvalt võeti näidisjaamaks Tartu veepuhastusjaam, kus arendatakse integreeritud tehnoloogilist kompleksi innovaatiliste ja säästvate lahendustega. Kuna reoveepuhastusjaamas toimub ka reoveesetest biogaasi tootmine, siis sidudes mikrovetikate kasvatamise tööstuskompleksiga, on võimalik vetikate kasvatamiseks ära kasutada biogaasi põletamisest pärinevat CO₂ süsinikallikana ning reovett saaks kasutada nii kasvu- kui toitekeskkonnana. Sedasi on võimalik mikrovetikaid kasutada biogaasi tootmisprotsessis kaassubstraadina ja ühtlasi on nendega võimalik puhastada reovett (Joonis 10).



Joonis 10. Mikrovetikatest biogaasi tootmisprotsess integreeritud süsteemitingimustes reoveepuhastusjaamaga.

Esitatud integreeritud süsteemi on kirjeldatud ja uuritud mitmete autorite poolt ning on leitud, et mikrovetikad täidavad süsteemis mitut erinevat eesmärki: toodetakse rohkem biogaasi, seotakse CO₂-te ning puhastatakse reovett (Andersson jt, 2011; Olsson jt, 2013; Sankaran ja Premalatha, 2014; Uggetti jt, 2014). Süsteemi peetakse ka ökoloogiliselt sõbralikuks tehnoloogiaks, kuna ei tekita sekundaarset reostust ning reoveepuhastuses muudab

järeltöötlemisprotsessid lihtsamaks. Ühtlasi on võimalik olemasolevat infrastruktuuri ära kasutada mikrovetikatest biogaasi tootmiseks. Juhul kui vetikate kasvusubstraate (toitained, CO₂-te) oleks vaja osta ja/või kogu mikrovetikatest biogaasi tootmise tehnika osta ja taristu rajada, siis võib see vetikamassi tootmise omahinna ja biogaasi tootmise väga kõrgeks ajada. Tõenäoliselt pole Eesti tingimustes ka biogaasi tootmine ainuüksi vetikatest perspektiivikas, seda ka töös mainitud puuduste tõttu, näiteks tootmiskulud, suur lämmastikuisaldus jne. Vastaval juhul oleks vajalik algse biomassi tootmiseks juurde anda ka CO₂-te, sest toodetavast biogaasi põletamisel emiteeruvast CO₂-st üksi ei piisa, st vetikamass seob rohkem CO₂-te kui vastavast massist toodetud biogaasi põletamisel tekib.

Seega vetikate kasvatamissüsteemi integreerimine juba olemasoleva reoveepuhastusjaamaga ja/või biogaasijaamaga on tõenäoliselt kõige mõeldavam lahendus. Kuigi võimalik oleks rajada neid ka elektrijaamade lähedusse, kus saaks ära kasutada jahutusvett vetikate kasvukeskkonnaks ning tööstuse suitsugaase CO₂ allikana, kuid seejuures tuleks lahendus leida toitainete kättesaadavusele ja rakendus toodetavale vetikamassile. Lisaks oleks biomassist energia tootmiseks vajalik välja ehitada vajalikud tootmissüsteemid või korraldada vetikamassi transport sinna, kus biomass on nõutud.

3.3.1 CO₂ sidumine ja biogaasi tootlikkus

Kuna mikrovetikad on võimelised oma biomassi siduma CO₂-te, siis arvutuslikult leiti biogaasi põletamisest emiteeruva CO₂ kogus, mida mikrovetikad saaksid kasvamiseks kasutada. Selle alusel arvutati ka toodetava vetikamassi kogus ning kuna ka neist endist on võimalik biogaasi toota, siis leiti ka mikrovetikatest toodetava biogaasi kogus. Kuna CO₂ sidumise tulemusena on võimalik välisõhu saastetasudelt kokku hoida, siis leiti arvutuslikult CO₂ sidumise tulemusena ärahoitavat CO₂ kulu rahalises väärtuses.

Arvutused teostati kolme erineva stsenaariumi korral (Tabel 3). Esmalt leiti arvutuslikult lähteolukorral põhinev biogaasi põletamisest emiteeruv CO₂, sellest kasvatatav võimalik mikrovetikate kogus ning biogaasi hulk, mida on võimalik sellest vetikamassist toota. Teise arvutusliku lähenemise aluseks oli süsinikneutraalne süsteem, mil nii lähteolukorra tingimustes tekkiv CO₂ kui ka mikrovetikatest toodetava biogaasi põletamisel emiteeriv CO₂ seotakse mikrovetikatesse. Selleks leiti vajaminev mikrovetikate kogus ning ühtlasi leiti neist toodetava biogaasi kogus. Ning viimasena analüüsiti olukorda, mil mikrovetikad moodustavad 12% Tartu biogaasijaama substraadist. Kuigi tehniliste näitajate alusel saab

biogaasijaamas veel lisaks reoveesetetele umbes 10% muid jäätmeid kääritada, siis vastav näitaja on vaid tähenduslik. Kuna teaduslikult on aga tõestatud, et mikrovetikate ja reoveesete kooskääritamisel oleks metaani tootlikkus suurim, kui substraatide vahetamine oleks 12% vetikaid ja 88% reoveesetet (Olsson jt, 2013), siis et maksimeerida ka Tartu biogaasijaamas biogaasi tootlikkust ja analüüsida reaalselt rakendatavat olukorda, võetakse arvutuste aluseks 12%-line mikrovetikate sisaldus kääritatavas substraadis. Selle alusel leitakse ka võimalik seotav CO₂ kogus ning toodetava biogaasi kogus.

Erinevate alternatiivsete lahenduste puhul on arvutused sooritatud päeva ja aasta lõikes. Seejuures aastase vetikamassi ja biogaasi tootlikkuse hindamisel on lähtutud kliimaatiliste tegurite analüüsi tulemustest, mil mikrovetikate kasvatamise ja sealhulgas neist ka biogaasi tootmise perioodiks on valitud 180 päeva (soojem poolaasta). Biogaasi tootlikkuse kasvu on võrreldud kogu aastase perioodiga ehk kui palju suureneks biogaasi saagis, kui lisaks lähteolukorra biogaasi tootlikkusele on võimalik ka 180 päeval kasvatatud mikrovetikatest biogaasi toota.

Tabel 3. Kolm CO₂ sidumise ja biogaasi tootlikkuse stsenaariumi Tartu biogaasijaama näitel.

Biogaasijaamast eralduva CO₂ sidumine	Tulemus	Ühik
<i>Päevas</i>		
CO ₂ kättesaadavus	6,8	t
Vetika biomass	3,8	t
Biogaasi tootlikkus	1900	m ³
<i>Aastas (180 p)</i>		
Vetika biomass	684,0	t
Biogaasi tootlikkus	342000	m ³
Biogaasi saagise kasv	25	%
Süsinikneutraalne süsteem		
<i>Päevas</i>		
CO ₂ kättesaadavus	13,7	t
Vetika biomass	7,6	t
Biogaasi tootlikkus	3800	m ³
<i>Aastas (180 p)</i>		
Vetika biomass	1368,0	t
Biogaasi tootlikkus	684000	m ³
Biogaasi saagise kasv	49	%

12% Tartu biogaasijaama substraadist	Tulemus	Ühik
<i>Päevas</i>		
CO ₂ kättesaadavus	2,9	t
Vetika biomass	1,6	t
Biogaasi tootlikkus	816	m ³
<i>Aastas (180 p)</i>		
Vetika biomass	293,7	t
Biogaasi tootlikkus	146837	m ³
Biogaasi saagise kasv	11	%

Kõigepealt leitigi lähteolukorral põhinedes päevasest maksimaalsest toodetavast 3800 m³ biogaasi kogusest, mida on võimalik toota reoveesetest ja umbes 10% ulatuses muudest jäätmetest, võimalik emiteeriv CO₂ kogus. Arvutuslikult tekib 1 m³ biogaasi põletamisest umbes 1,8 kg CO₂-te ning seega päevas emiteeritakse jaamast biogaasi põletamise tulemusena arvutuslikult 6,8 tonni CO₂-te. Kuna 1 tonn mikrovetikaid vajavad kasvamiseks 1,8 tonni CO₂-te (Wang jt, 2013), siis emiteeritavast CO₂-st on võimalik kasvatada umbes 3,8 tonni mikrovetikaid päevas. Neist omakorda on võimalik päevas toota 1900 m³ biogaasi ja aastas kokku 342000 m³ ning seejuures jaama biogaasi saagis suureneks 25% võrra aastas. Suurenenud tootlikkusega oleks võimalik katta umbes 29895 leibkonna (2,2 inimest) biogaasi nõudluse, arvestades biogaasi energeetiliseks vajaduseks Eestis ühe elaniku kohta 5,2 m³ aastas (Kask, 2010).

Kuna mikrovetikatest toodetava biogaasi põletamisel emiteerib samuti veel CO₂-te, siis teise alternatiivse süsteemi puhul leiti arvutuslikult vetikamassi kogus, kui süsteem oleks süsinikneutraalne ehk kõigist substraatidest toodetud biogaasi põletamisel tekkinud CO₂ seotakse mikrovetikatesse. Sel juhul oleks vajalik vetikakogus 7,6 tonni, mis seaks nii reoveesette biogaasi põletamisel tekkiva CO₂ heite 6,8 tonni kui ka kasutatavast vetikamassist toodetud biogaasi põletamisel tekkiva CO₂ heite 6,8 tonni. Vastavast vetikamassist on päevas võimalik toota 3800 m³ biogaasi ja aastas kokku 684000 m³ biogaasi ning seejuures aastane jaama biogaasi saagis suureneks 49% võrra. Kuna mikrovetikaid kasvatatakse vaid 180 päeval aastas, siis ka süsinikneutraalne süsteem vastab vaid sellele perioodile ning ülejäänud aastast emiteeritakse CO₂ välisõhu.

Kolmandas stsenaariumis leiti vetikamassi kogus, mis moodustab 12% kogu võimalikust kääritatavast substraadist. Arvutuslikult saadi selleks 1,6 tonni vetikaid päevas ning ühtlasi seoksid nad päevas oma biomassi 2,9 tonni CO₂-te. Kasvatatavast vetikamassist oleks päevas

võimalik toota 816 m³ biogaasi ja aastas kokku (180 päeval) 146837 m³ biogaasi, mille tulemusena suureneks biogaasijaamas toodetava biogaasi kogus 11% võrra aastas. Suurenenud biogaasi kogus võimaldaks lisaks katta umbes 12835 leibkonna energeetilise biogaasi vajaduse aastas.

Kuna mikrovetikate kasvatamine integreerituna Tartu veepuhastusjaama kompleksi võimaldab siduda biogaasi tootmisest emiteerivat CO₂ heidet, siis selle võrra saaks ettevõtte kui saastetasu maksekohuslasena vähendada CO₂ välisõhku paiskamise saastetasu summat. Eesti Riigikogu seaduse „Keskkonnatasude seaduse“ alusel on süsinikdioksiidi (CO₂) saastetasumäär tonni kohta 2€ Seda arvestatuna on arvutuslikult leitud hinnanguline saastetasu mittemaksmisest tulenev kokkuvõtte aastas (Tabel 4).

Tabel 4. Mikrovetikate biomassi seotud biogaasi põletamisel eralduv CO₂ ärahoitud kulu aastas kolme erineva stsenaariumi korral Tartu biogaasijaama näitel.

Biogaasijaamast eralduva CO₂ sidumine	Tulemus	Ühik
Kogu toodetav biogaasi kogus	1729000	m ³ /a
Kogu biogaasi põlemisel eralduv CO ₂ kogus	3112	t CO ₂ /a
Vetikate biomassi seotav CO ₂ kogus	1231	t CO ₂ /a
Vetikate puhul CO ₂ heite vähenemise osakaal aastas	40	%
CO ₂ saastetasumäär	2	€t
Kogu biogaasi põletamisest ärahoitav CO ₂ kogus	1231	t CO ₂ /a
Kogu biogaasi põletamisest ärahoitav CO ₂ kulu aastas	2462	€a
Süsinikneutraalne süsteem		
Kogu toodetav biogaasi kogus	2071000	m ³ /a
Kogu biogaasi põlemisel eralduv CO ₂ kogus	3728	t CO ₂ /a
Vetikate biomassi seotav CO ₂ kogus	2462	t CO ₂ /a
Vetikate puhul CO ₂ heite vähenemise osakaal aastas	66	%
CO ₂ saastetasumäär	2	€t
Kogu biogaasi põletamisest ärahoitav CO ₂ kogus	2462	t CO ₂ /a
Kogu biogaasi põletamisest ärahoitav CO ₂ kulu aastas	4925	€a
12% Tartu biogaasijaama substraadist		
Kogu toodetav biogaasi kogus	1387000	m ³ /a
Kogu biogaasi põlemisel eralduv CO ₂ kogus	2497	t CO ₂ /a
Vetikate biomassi seotav CO ₂ kogus	529	t CO ₂ /a
Vetikate puhul CO ₂ heite vähenemise osakaal aastas	21	%
CO ₂ saastetasumäär	2	€t
Kogu biogaasi põletamisest ärahoitav CO ₂ kogus	529	t CO ₂ /a
Kogu biogaasi põletamisest ärahoitav CO ₂ kulu aastas	1057	€a

Esimese stsenaariumi korral, kui mikrovetikaid kasvatatakse lähteolukorra tingimustes, on aastas võimalik 684 tonni vetikamassi tootmisel siduda 40% biogaasi põletamisest emiteeruvast CO₂ heitest ning saastetasu maksmisele pealt hoitakse kokku 2462€ aastas. Juhul kui mikrovetikate kasvatamine toimuks süsinikneutraalse süsteemi tingimustes, siis aastas toodetav vetikamassi kogus 1364 tonni väldiks umbes 66% biogaasijaamast lähtuvast CO₂-st, kuna seoksid oma biomassi 2462 tonni CO₂-te aastas ning saastetasu maksmiselt hoitakse kokku 4925€ aastas. Kui aga mikrovetikad moodustaksid 12% kääritatavast substraadist ning maksimaalne biogaasi toodang päevas saab olla hinnanguliselt 3800 m³, siis vastav vetikamass seoks aasta jooksul 21% biogaasi põletamisest tekkivat CO₂-te ning saastetasult oleks võimalik kokku hoida umbes 1057€aastas.

Viimase stsenaariumi puhul võeti päevane kogu biogaasi tootlikkus 3800 m³ hinnanguliselt, võttes arvesse ka AS Tartu Veevärk reoveepuhasti juhataja poolt edastatud infot tehniliste näitajate kohta. Vastav biogaasi tootlikkuse hinnang mõjutab vaid CO₂ sidumise aastase osakaalu hinnangut, kuid ei mõjuta saastetasu maksmisest kokkuhoitavat tulemust. Tegelikuses ühe kääritiga ilmselt ka päevast biogaasi tootlikkust oluliselt suuremaks ei saa ajada, sest tehnoloogiline protsess ja mahud seavad omad piirangud. Suurema koguse puhul tekiks küsimus ka gaasi kasutamises, kas seadmed võimaldavad suurema koguse ära põletada ja kas soojusenergiat on võimalik ära kasutada. Talvel ilmselt ei oleks sellega probleemi, küll aga suvel. Praegu töötab ka biogaasijaam alles osakoormusega, mil päevane gaasitoodang on ligikaudu 1800-2000 m³ ning eeldades, et ka kääritatav reoveesettekogus tulevikus märkimisväärselt ei suurene, siis on vetikamassi kasutamine kaassubstraadina, osakaaluga 12% kogu kääritatavast substraadist, lagunemisprotsessis alternatiivne ja reaalne võimalik lahendus.

3.3.2 Reovee puhastamisest tulenev lisandväärtus

Mikrovetikate kasvatamine reoveepuhastusjaamaga integreeritud süsteemitingimustes võimaldab mikrovetikatel reovett kasutada kasvukeskkonnana, kust neil on võimalik omastada kasvuks vajalikke toitaineid. Sedasi hoitakse toitelahuse (toitained+vedelik/vesi) kuludelt kokku. Teisalt toitainete eemaldamine võimaldab puhastada ka reovett. Juhul kui 12% Tartu veepuhastusjaama biogaasi tootmise substraadist moodustaksid mikrovetikad ning võttes arvesse Feng jt (2011) uuringu tulemusi, mis näitasid, et 1 tonni vetikamassi tootmisel on võimalik käidelda rohkem kui 1400 m³ reovett, siis sel juhul puhastaksid 1,6 tonni mikrovetikaid päevas umbes 2240 m³ reovett. Seejuures arvestades, et Tartu

veepuhastusjaama jõudvas reovee sissevoolus on lämmastiku sisaldus 70-150 mg/l ja fosfori sisaldus 8-40 mg/l, siis päevas on võimalik mikrovetikate biomassi siduda arvutuslikult keskmiselt umbes 246400 kgN/m³ ja 53760 kgP/m³. Võttes arvesse, et tasu heitvee ärajuhtimise eest (elanikkonna olmereovee käitlus) on 1,08€ (ilma käibemaksuta), siis hinnanguliselt ettevõtte enda käitluskulu võiks olla 50% võrra väiksem. Seega arvutuslikult puhastatakse mikrovetikate päevas reovett 1210€väärtuses. Vastav kasum oleks maksumus, mis oleks võimalik maha arvestada vetikamassi tootmishinnast reovees.

Tartu veepuhastusjaamas ei oleks mikrovetikate kasvatamine järelsetiti reovee puhastuse faasis enam mõistlik, kuna toitainete tasemed on juba alla viidud ja sellise vee saab ka keskkonda oluliselt kahjustamata loodusesse juhtida. Samuti oleks selles etapis probleem biomassi kogumisega, sest pärast järelsetitit ja biotiike oleks vaja vetikate kättesaamiseks kasutada flokulanti ja biomass välja setitada. Selleks oleks uuesti vaja kontaktbasseini ja setitit ning ehitamine läheks kalliks.

Otstarbekas on üritada vetikate abil puhastada eelsetitist väljunud vett, mil toitainete kontsentratsioon on kõrge. Ent piirangu seab siiski mahutite olemasolu ja mikrovetikate kasvuaeg. Samuti tuleb arvestada, et fotoautotroofsed mikrovetikad vajavad valgust ja ei ole aktiivsed öisel ajal. Valguse vajadus limiteerib ka kasvatamissüsteemi ehituslikku lahendust. Seetõttu ongi oluliseks limiteerivaks faktoriks valgusrežiim ja ka Eesti eripära arvestades aasta külmem periood.

Vetikakütuseid on tulevikus võimalik toota majanduslikult ja keskkondlikult jätkusuutlikul viisil vaid juhul, kui energiabilanss on positiivne ning selleks on tarvis tehnoloogiaid täiustada ja optimeerida, et muuta tootmisprotsess võimalikult tõhusaks. Saavutamaks kasvatamissüsteemide ja energia tootmise tasuvust on eesmärkide täitmise üheks võimaluseks ka liikide kohandamine geneetilisel ja ainevahetuslikul teel. Teiseks võimaluseks on uute kasvatamistehnoloogiate arendamine või olemasolevate süsteemide täiustamine. Kuna mikrovetikatest bioenergia tootmine on väga uudne valdkond, tooks see kaasa ka suured muudatused ettevõtte tasandil: nii töökorralduses kui tehnoloogiliselt. Mikrovetikate mõju energiamajandusele ja tasuvus Eesti tingimustes vajab täpsustamist tehnoloogia katsepõhistes analüüsidest ja hinnangutes, samuti tuleb tasuvuse hindamise metoodikat täiustada. Ühtlasi töötab vetikate suur mitmekesisus ka seda, et biomassile leitakse veelgi uusi rakendusi ning kui vetikate kasvatamise kogemus suureneb, võivad ka biokütused muutuda rohkem huvipakkuvaks ja leiavad laialdasemat kasutamist.

Üldiselt on uue tootmissuuna arendamine, laiem levik ja uuendusliku tehnoloogia läbimurdeline ning tööstuslik rakendamine kasvava ülemaailmse tähtsusega, mis on seotud keskkonna saastatuse vähendamisega ja sealhulgas atmosfäärisüsinikuga seotud globaalprobleemide leevendamisega. Eelkõige on vetikatehnoloogia seotud kasvuhoonegaaside vähendamisega, kuna atmosfääri CO₂ kontsentratsiooni tõus on korrelatsioonis fossiilkütuste põletamise kasvuga, siis pidurdades fossiilsete kütuste koguste põletamist ja fikseerides CO₂ biomassi, vähendatakse ka negatiivset kasvuhooneefekti (Heitur, 2014). Ühtlasi on see kasulik ettevõtetele, kes on sunnitud iga-aastaselt saastekvoote ostma. Kuid mikrovetikatest biokütuste tootmine väldib CO₂ kulutusi vaid juhul, kui sidumine vetikate biomassi on suurem kui tööoperatsioonide tõttu emiteeruv kogus. Lisaks kasvuhoonegaasidele väheneks ka muu õhusaaste sattumine välisõhku ning võimalik oleks käidelda (tööstuslikku) reovett, eemaldades toitained, raskmetalle ja muid ühendeid. Suitsugaaside kasutamise kombineerimine reovee kasutamisega aitaks muuta mikrovetikate biomassist toodetavate biokütuste hinna konkurentsivõimelisemaks (Podkuiko jt, 2014). Ühtlasi aitaks mikrovetikatest biogaasi tootmine vähendada ka väliskaubanduse defitsiiti, kuna veel suurema osa täna imporditavast maagaasist saaks asendada kohapeal toodetava biogaasiga. Nii väheneks Eesti sõltuvus importkütustest ja tõuseks riigi majanduse konkurentsivõime. Ühtlasi loots vetikatehnoloogia arendamine Eesti aluse ka kolmanda põlvkonna biokütuste tootmisele riigis, millega võimaldatakse hõlpsamini saavutada Eesti energiamajanduse arengukava eesmärke.

KOKKUVÕTE

Kuna taastuenergia valdkonna kohalikes oludes rakendamine on järjest suurema strateegilise tähtsusega nii keskkonnakaitselisest kui ka regionaalmajanduslikust aspektist lähtuvalt, siis erinevate taastuenergiaallikate kasutuselevõtt aitaks vähendada sõltuvust fossiilsetest kütustest.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli anda ülevaade fotoautotroofsete mikrovetikate kasvatamise, kogumise ja biogaasiks muundamise tehnoloogiast ning protsesside mõjuteguritest, ühtlasi analüüsida vetikatehnoloogia rakendamise potentsiaali Eestis biogaasi tootmiseks. Selleks sooritati teaduskirjandusel ja arvutuslikul meetodil põhinev teostatavuse ja tasuvuse analüüs.

Fotoautotroofsete mikrovetikate produktiivsust mõjutavad kliima iseloom, CO₂ ja toitainete kättesaadavus, veeressursid ja kasvatamise asukohavalik, mis ühtlasi sõltub kõikidest eelnevatest teguritest. Eestis mõjutavad mikrovetikate kasvatamist eelkõige kliimaatilised tegurid, millest olulisemateks on päikesevalgus ja temperatuur. Vastavate parameetrite analüüsi tulemusena leiti, et mikrovetikate kasvatamiseks oleks sobilik periood aprillist septembrini, mil keskmine temperatuur on kõrgem, päikesepaistelist aega rohkem ning päikese kiirguse hulk suurem kui aastas keskmiselt.

Mikrovetikate produktiivsust mõjutavad ka süsteemid, kus neid kasvatatakse. Maailmas enimlevinud kasvatamissüsteemideks on ringvoolukanalid, torujad või plaatjad fotobioreaktorid. Ühtlasi leiti käesolevas töös vastavates süsteemides kasvatatavate mikrovetikate tootmishinnad. 1 kg vetikamassi tootmishinnaks ringvoolukanalis saadi arvutuslikult 10,79€, torujas fotobioreaktoris 8,63€ ning plaatjas fotobioreaktoris 10,69€. Võttes arvesse aga Eesti kliimaatilisi tingimusi, siis aastaringseks kasvatamiseks oleks vajalik mikrovetikate kasvatamine kasvuhoonetes koos kütmisega külmemal perioodil. Kuid vastava tehnoloogia rakendamine suurendaks tootmishinda ja vähendaks majanduslikku otstarbekust. Seega oleks Eestis mikrovetikaid monokultuurina mõttekas kasvatada fotobioreaktorites soojemal poolaastal.

Kuna suurte tootmiskulutuste tõttu, mis seisnevad ka tehnilistes probleemides, pole mikrovetikate ja neist biokütuste tootmine tööstuslikesse mastaapidesse praegu veel jõudnud, siis üha rohkem on tähelepanu pälvinud mikrovetikate kasvatamise integreerimine tööstustootmisega, mille jäätmevoogudest saab kasutada kasvatamiseks vajalikke ressursse.

Ühtlasi on niimoodi võimalik tootmiskuludelt kokku hoida. Seega taolise lahenduse analüüsimiseks võeti näidismudeliks Tartu veepuhastusjaam, kus lisaks reovee puhastamisele toimub reoveesetest biogaasi tootmine. Sidudes mikrovetikate kasvatamise reoveepuhastus- ja biogaasijaama kompleksiga, on võimalik vetikate kasvatamiseks ära kasutada biogaasi põletamisest pärinevat süsihappegaasi süsinikallikana ning reovett saaks kasutada nii kasvu- kui toitekeskkonnana. Ühtlasi saaks toodetud vetikamassi suunata biogaasi tootmisesse.

Arvutuslikult leiti, et kui biogaasijaam toodab päevas 3800 m³ biogaasi, siis selle tulemusena seoksid 3,8 tonni vetikaid päevas umbes 6,8 tonni CO₂-te ning aastas oleks võimalik CO₂ saastetasudelt kokku hoida 2462€ Ühtlasi on kasvatatud vetikamassist võimalik päevas toota 1900 m³ biogaasi ning aastane biogaasi saagis jaamas suureneks 25% võrra. Lisaks uuriti süsinikneutraalset süsteemi, mil nii kääritavast reoveesetest ja ka mikrovetikatest toodetava biogaasi põletamisel emiteeriv CO₂ seotakse mikrovetikatesse. Tulemusena saadi arvutuslikult, et päevas toodetav 7,6 tonni vetikamassi seob 13,7 tonni CO₂-te päevas ning aastas oleks seega võimalik emissioonikuludelt kokku hoida arvutuslikult 4925€ Kuid kuna mikrovetikaid kasvatatakse vaid 180 päeva aastast, siis ka süsinikneutraalne süsteem vastab sellele perioodile. Vastavast vetikamassist on aga päevas võimalik toota 3800 m³ biogaasi ja seega aastane biogaasi saagis suureneks 49% võrra.

Kolmanda alternatiivse võimalusena analüüsiti olukorda, kui mikrovetikad moodustaksid 12% kogu Tartu reoveepuhastusjaama kääritatavast substraadist. Sel juhul on Tartu veepuhastusjaamas võimalik kasvatada 1,6 tonni vetikaid päevas, mis seoksid oma biomassi 2,9 tonni CO₂-te ning aastas oleks võimalik saastetasude mittemaksmiselt kokku hoida arvutuslikult 1057€ Ühtlasi oleks kasvatatavast vetikamassist võimalik toota päevas 816 m³ biogaasi ja tulemusena suureneks biogaasijaamas toodetava biogaasi kogus 11% võrra aastas. Kuigi vastav integreeritud süsteemi tehnoloogiline käsitlus on kõige mõeldavam alternatiivne lahendus, nõuaks süsteemi reaalne rakendamine tehnoloogiate ühendamist, protsessi mõistmist ja tõhustamist, majanduslikku ja energeetilist optimeerimist jne.

Kokkuvõttes võib öelda, et mikrovetikate kasvatamine integreerituna reoveepuhastus- ja biogaasijaamaga näib olevat kõige efektiivsem ning keskkonnasäästlikum viis mikrovetikate kasvatamiseks ning neist bioenergia tootmiseks. Seega on mikrovetikatest biogaasi tootmise potentsiaal integreeritud süsteemitingimustes realselt arvestatav ning oleks õigustatud selle ökotehnoloogilise suuna arendamine. Kontseptsiooni reaalne rakendamine omaks suurt tähtsust ka nii Eesti energeetikavaldkonnas kui ka kliimapoliitikas.

TÄNUAVALDUSED

Töö autor tänab väga oma juhendajat Kaido Soosaart ja kaasjuhendajat Antti Rooset nendepoolsete nõuannete ja soovitude eest, aidates kaasa töö valmimisele. Samuti tänab töö autor Keskkonnaagentuuri (KAUR) Riigi Ilmateenistust, kust telliti Eesti kliimaparameetrite analüüsimiseks vajalikud andmed ning ka AS Tartu Veevärk reoveepuhasti juhatajat Kaido Põhakot, kes jagas Tartu reoveepuhastusjaama ja biogaasijaama kohta tööks vajalikku informatsiooni. Lisaks kuulub töö autori siiras tänu Ivo Krustokile, kes oli väga vastutulelik ja abistav töö koostamise käigus tekkinud küsimuste lahendamisel ja kommenteerimisel. Veel tänab töö autor algoloog Erich Kukke, kes oli abiks oma teadmiste ja kogemustega. Lõpetuseks suur tänu ka kõikidele teistele, kes töö valmimisele kaasa aitasid ja toeks olid.

KASUTATUD KIRJANDUS

Trükipublikatsioonid

- Abas, N., Kalair, A. ja Khan, N., 2015. Review of fossil fuels and future energy technologies. *Futures*, **69**: 31-49.
- Abinandan, S., Premkumar, M., Praveen, K. ja Shanthakumar, S., 2013. Nutrient Removal From Sewage - An Experimental Study At Laboratory Scale Using Microalgae. *International Journal of ChemTech Research*, **5** (5): 2090–2095.
- Acién, F.G., Fernández, J. M., Magán, J. J. ja Molina, E., 2012. Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. *Biotechnology Advances*, **30** (6): 1344–1353.
- Acién, F. G., Fernández, J. M. ja Molina-Grima, E., 2014. Economics of Microalgae Biomass Production. Chapter 14. Rmt: Pandey, A., Lee, D.-J., Chisti, Y. ja Soccol, C. R. (toim.), *Biofuels from Algae*. Elsevier: 313-325.
- Adams, K. J., 2014. Effects of thermal pre-treatment on anaerobic digestion of *Nannochloropsis salina* biomass for biogas production. Master thesis. Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland.
- Andersson, V., Broberg, S. ja Hackl, R., 2011. Integrated Algae Cultivation for Biofuels Production in Industrial Clusters: Program Energisystem. ISSN 1403–8307. Arbetsnotat nr 47.
- Alabi, A. O., Tampier, M. ja Bibeau, E., 2009. Microalgae Technologies & Processes for Biofuels/ Bioenergy Production in British Columbia: Current Technology, Suitability & Barries to Implementation. The British Columbia Innovation Council.
- AquaFUELS, 2011. Algae and aquatic biomass for a sustainable production of 2nd generation biofuels. Cooperation. Theme 5 - Energy.
- Arnold, M., 2013. Sustainable algal biomass products by cultivation in waste water flows. VTT Technology 147, Espoo.
- Awasthi, M. ja Singh, R. K., 2011. Development of algae for the production of bioethanol, biomethane, biohydrogen and biodiesel. *International Journal of Current Science*, **1** (1): 14–23.

- Bahadar, A. ja Khan, M. B., 2013. Progress in energy from microalgae: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **27**: 128–148.
- Besuijen, J. P., 2014. Large-scale algae production in greenhouses: modelling, technical design and economic analysis. Master thesis. Wageningen University, Netherland.
- Blanken, W., Cuaresma, M., Wijffels, R. H. ja Janssen, M., 2013. Cultivation of microalgae on artificial light comes at a cost. *Algal Research*, **2** (4): 333-340.
- Brennan, L. ja Owende, P., 2010. Biofuels from microalgae - A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14** (2): 557–577.
- Chen, C.-Y., Yeh, K.-L., Aisyah, R., Lee, D.-J. ja Chang, J.-S., 2011. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technology*, **102** (1): 71–81.
- Chen, H., Zhou, D., Lou, G., Zhang, S. ja Chen, J., 2015. Macroalgae for biofuels production: Progress and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **47**: 427-437.
- Chisti, Y., 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, **25** (3): 294-306.
- Chisti, Y., 2008. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in Biotechnology*, **26** (3): 126–131.
- Craggs, R. J., Lundquist, T. J. ja Benemann, J. R., 2013. Wastewater Treatment and Algal Biofuel Production. Chapter 9. Rmt: Borowitzka, M. A. ja Moheimani, N. R. (toim.), *Algae for Biofuels and Energy. Development in Applied Phycology 5*, Springer Dordrecht Heidelberg Press, New York, London: 153-164.
- Darzins, A., Pienkos, P. ja Edye, L., 2010. Current Status and Potential for Algal Biofuels Production. A report to IEA Bioenergy Task 39.
- Davis, R., Aden, A. ja Pienkos, P. T., 2011. Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production. *Applied Energy*, **88** (10): 3524–3531.
- Dębowski, M., Zieliński, M., Grala, A. ja Dudek, M., 2013. Algae biomass as an alternative substrate in biogas production technologies - Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **27**: 596–604.
- Demirbas, A., 2010. Use of algae as biofuel sources. *Energy Conversion and Management*, **51** (12): 2738–2749.

- Demirbas, A. ja Fatih Demirbas, M., 2011. Importance of algae oil as a source of biodiesel. *Energy Conversion and Management*, **52** (1): 163–170.
- Dragone, G., Fernandes, B., Vicente, A. A. ja Teixeira, J. A., 2010. Third generation biofuels from microalgae. Rmt: Mendéz-Vilas, A. (toim.), *Current Research, Technology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology*. Formatex, Microbiology Series N°2 VOL 1: 1355-1366.
- Dutta, K., Daverey, A. ja Lin, J.-G., 2014. Evolution retrospective for alternative fuels: First to fourth generation. *Renewable Energy*, **69**: 114-122.
- Ehimen, E. A., Sun, Z. F., Carrington, C. G., Birch, E. J. ja Eaton-Rye, J. J., 2011. Anaerobic digestion of microalgae residues resulting from the biodiesel production process. *Applied Energy*, **88** (10): 3454–3463.
- Elering, 2012. Eesti elektrisüsteemi varustuskindluse aruanne 2012. Elering toimetised nr 3, Tallinn.
- Feng, Y., Li, C. ja Zhang, D., 2011. Lipid production of *Chlorella vulgaris* cultured in artificial wastewater medium. *Bioresource Technology*, **102** (1): 101-105.
- Fishman, D., Majumdar, R., Morello, J., Pate, R. ja Yang, J., 2010. National Algal Biofuels Technology Roadmap. U.S. Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy, Biomass Program.
- Geider, R. J. ja La Roche, J., 2002. Redfield revisited: variability of C:N:P in marine microalgae and its biochemical basis. *European Journal of Phycology*, **37** (1): 1–17.
- Golueke, C. G., Oswald, W. J. ja Gotaas, H. B., 1957. Anaerobic digestion of algae. *Applied Microbiology*, **5** (1): 47–55.
- Griffiths, M. J., Dicks, R. G., Richardson, C. ja Harrison, S. T. L., 2011. Advantages and Challenges of Microalgae as a Source of Oil for Biodiesel. Chapter 9. Rmt: Stoytcheva, M. ja Montero, G. (toim.), *Biodiesel - Feedstocks and Processing Technologies*. InTech: 177-200.
- Grima, E. M., Belarbi, E.-H., Fernández, F. G. A., Medina, A. R. ja Chisti, Y., 2003. Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnology Advances*, **20** (7–8): 491–515.

- Grönlund, E., Klang, A., Falk, S. ja Hanæus, J., 2004. Sustainability of wastewater treatment with microalgae in cold climate, evaluate with emergy and socio-ecological principles. *Ecological Engineering*, **22** (3): 155–174.
- Heitur, H., 2014. Mikrovetika *Chlorella vulgaris* Beyerincki kasvatamine CO₂ sidumise eesmärgil. Magistritöö taastuenergia ressurside erialal. Eesti Maaülikool, Tartu.
- Ho, S.-H., Chen, C.-Y., Lee, D.-J. ja Chang, J.-S., 2011. Perspectives on microalgal CO₂-emission mitigation systems - A review. *Biotechnology Advances*, **29** (2): 189–198.
- Iwamoto, H., 2007. Industrial Production of Microalgal Cell-Mass and Secondary Products - Major Industrial Species: *Chlorella*. Chapter 11. Rmt: Richmond, A. (toim.), *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, UK: 255–263.
- Janssen, M., 2002. Cultivation of microalgae: effect of light/dark cycles on biomass yield. Thesis Wageningen University, Wageningen, The Netherlands - with summary in Dutch.
- Jorquera, O., Kiperstok, A., Sales, E. A., Embiruçu, M. ja Ghirardi, M. L., 2010. Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors. *Bioresource Technology*, **101** (4): 1406–1413.
- Krustok, I., Nehrenheim, E. ja Odlare, M., 2012. Cultivation of microalgae for potential heavy metal reduction in a wastewater treatment plant. International Conference on Applied Energy. Suzhou, China.
- Krustok, I., Nehrenheim, E., Odlare, M., Liu, M. ja Li, S., 2013. Cultivation of indigenous algae for increased biogas production. International Conference on Applied Energy. Pretoria, South Africa.
- Kukk, E., 1963. Üherakuliste vetikate massskultuurid ja nende kasutamine. III Ülevaated. Rmt: Alles, P., Pavel, Ü., Perk, A. ja Trass, H. (toim.), *Botaanika-alased tööd*. Tartu Riikliku Ülikooli Toimetised, vihik 136, Tartu: 183-200.
- Larsdotter, K., 2006. Wastewater treatment with microalgae - a literature review. *Vatten*, **62**: 31–38.
- Lüsi, M., 2010. Energiasäästu ideeraamat. PlanEnergi. Transplan.

- Maity, J. P., Bundschuh, J., Chen, C.-Y. ja Bhattacharya, P., 2014. Microalgae for third generation biofuel production, mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: Present and future perspectives - A mini review. *Energy*, **78**: 104-113.
- Mata, T. M., Martins, A. A. ja Caetano, N. S., 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14** (1): 217–232.
- Mehta, S. K. ja Gaur, J. P., 2005. Use of algae for removing heavy metal ions from wastewater: progress and prospects. *Critical Reviews in Biotechnology*, **25** (3): 113–152.
- Menert, A., Kallaste, T., Laur, A. ja Vaalu, T., 2011. Tehnoloogilised võimalused biogaasi tootmiseks Eestis. *Keskkonnatehnika* **6**: 28–32.
- Milledge, J. J. ja Heaven, S., 2013. A review of the harvesting of micro-algae for biofuel production. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, **12** (2): 165-178.
- Miranda, L. C. M. ja Lima, C. A. S., 2011. On the forecasting of the challenging world future scenarios. *Technological Forecasting and Social Change*, **78** (8):1445-1470.
- Montingelli, M. E., Tedesco, S. ja Olabi, A. G., 2015. Biogas production from algal biomass: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **43**: 961-972.
- Muñoz, R. ja Guieysse, B., 2006. Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review. *Water Research*, **40** (15): 2799–2815.
- Normak, A., Volmer, E., Orupõld, K., Kaasik, A. ja Kask, Ü., 2009. Biogaasi tootmine ja kasutamine. Käsiraamat. Tartu.
- Norsker, N.-H., Barbosa, M. J., Vermuë, M. H. ja Wijffels, R. H., 2011. Microalgal production - A close look at the economics. *Biotechnology Advances*, **29** (1): 24–27.
- Olsson, J., Shabiimam, M. A., Nehrenheim, E. ja Thorin, E., 2013. Co-digestion of cultivated microalgae and sewage sludge from municipal waste water treatment. International Conference on Applied Energy. Pretoria, South Africa.
- Petrick, I., Dombrowski, L., Kröger, M., Beckert, T., Kuchling, T. ja Kureti, S., 2013. Algae Biorefinery - Material and energy use of algae. DBFZ Report No. 16. Leipzig.
- Pison, G., 2013. The Population of the World. INED. Population & Societies. Number 503.

- Prajapati, S. K., Kaushik, P., Malik, A. ja Vijay, V. K., 2013. Phycoremediation coupled production of algal biomass, harvesting and anaerobic digestion: Possibilities and challenges. *Biotechnology Advances*, **31** (8): 1408–1425.
- Pudkuiko, L., 2014. Mikrovetikate biotehnoloogilistest rakendustest. Maaelu Edendaja. Teemaleht põllu- ja metsamajanduse huvilistele. *Postimees*, **10/14**: 22-23.
- Razzak, S. A., Hossain, M. M., Lucky, R. A., Bassi, A. S. ja de Lasa, H., 2013. Integrated CO₂ capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **27**: 622–653.
- Ritslaid, K., Podkuiko, L., Olt, J. ja Kikas, T., 2014. Mikrovetikad taastuenergiaallikana. TEUK XVI. Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine. Kuueteistkümnenda konverentsi kogumik. Eesti Maaülikool, Tartu: 112-122.
- Richardson, J. W., Johnson, M. D., Zhang, X., Zemke, P., Chen, W. ja Hu, Q., 2014. A financial assessment of two alternative cultivation systems and their contributions to algae biofuel economic viability. *Algal Research*, **4**: 96–104.
- Rösch, C., Skarka, J. ja Patyk, A., 2009. Microalgae opportunities and challenges of an innovative energy source. Paper presented at the 17th European Biomass Conference and Exhibition. Hamburg, Germany: 1–7.
- Salerno, M., Nurdogan, Y. ja Lundquist, T. J., 2009. Biogas Production from Algae Biomass Harvested at Wastewater Treatment Ponds. Paper presented at the Proceedings of the 2009 Bioenergy Engineering Conference. Seattle, Washington.
- Salo, E., 2014. Reoveepuhustus vetika-bakterikonsortsiumi abil. Bakalaureusetöö. Tartu Ülikool, Tartu.
- Sankaran, K. ja Premalatha, M., 2014. Coupling microalgae technology in the treatment process of distillery wastewater. *International Journal of Advanced Technology & Engineering Research*. National Conference on "Renewable Energy Innovations for Rural Development".
- Schot, P. P. ja Stijkel, A., 2014. Assessment: Sustainable Projects for the Ouderkerkerplas – Water. *Transdisciplinary Case Study (GEO4-2302)*. Sustainable Development & Water Science and Management. Faculty of Geosciences, University of Utrecht.
- Slade, R. ja Bauen, A., 2013. Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. *Biomass and Bioenergy*, **53**: 29–38.

- Slegers, P. M., Leduc, S., Wijffels, R. H., van Straten, G. ja van Boxtel, A. J. B., 2015. Logistic analysis of algae cultivation. *Bioresource Technology*, **179**: 314–322.
- Suali, E. ja Sarbatly, R., 2012. Conversion of microalgae to biofuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16** (6): 4316–4342.
- Surendhiran, D. ja Vijay, M., 2012. Microalgal biodiesel - A Comprehensive Review on the Potential and Alternative Biofuel. *Research Journal of Chemical Sciences*, **2** (11): 71-82.
- Zamalloa, C., Vulsteke, E., Albrecht, J. ja Verstraete, W., 2011. The techno-economic potential of renewable energy through the anaerobic digestion of microalgae. *Bioresource Technology*, **102** (2): 1149-1158.
- Zhong, W., Zhang, Z., Luo, Y., Qiao, W., Xiao, M. ja Zhang, M., 2012. Biogas productivity by co-digesting Taihu blue algae with corn straw as an external carbon source. *Bioresource Technology*, **114**: 281–286.
- Torres, Á., Famoso, F. G., Rincón, B., Bartacek, J., Borja, R. ja Jeison, D., 2013. Challenges for Cost-Effective Microalgae Anaerobic Aigestion. Chapter 6. Rmt: Chamy, R. ja Rosenkranz, F. (toim.), *Biodegradation - Engineering and Technology*. InTech: 139–159.
- Uggetti, E., Sialve, B., Trably, E. ja Steyer, J.-P., 2014. Integrating microalgae production with anaerobic digestion: a biorefinery approach, **8** (4): 516-529.
- Ugursal, V. I., 2014. Energy consumption, associated questions and some answers. *Applied Energy*, **130**: 783-792.
- Vivekanand, V., Eijsink, V. G. H. ja Horn, S. J., 2012. Biogas production from the brown seaweed *Saccharina latissima*: thermal pretreatment and codigestion with wheat straw. *Journal of Applied Phycology*, **24** (5): 1295-1301.
- Wang, X., Nordlander, E., Thorin, E. ja Yan, J., 2013. Microalgal biomethane production integrated with an existing biogas plant: A case study in Sweden. *Applied Energy*, **112**: 478–484.
- Wang, Y., 2013: *Microalgae as the Third Generation Biofuel: Production, Usage, Challenges and Prospects*. Master thesis in Sustainable Development at Uppsala University.

Ward, A. J., Lewis, D. M. ja Green, F. B., 2014. Anaerobic digestion of algae biomass: A review. *Algal Research*, **5**: 204-214.

Wiley, P. E., Campbell, J. E. ja McKuin, B., 2011. Production of Biodiesel and Biogas from Algae: A Review of Process Train Options. *Water Environment Research*, **83** (4): 326–338.

Yen, H.-W. ja Brune, D. E., 2007. Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane. *Bioresource Technology*, **98** (1): 130–134.

Õigusaktid

RT I, 30.12.2014, 21. „Keskkonnatasude seadus.“ Riigikogu seadus. Vastu võetud 7. detsembril 2005. aastal.

Interneti viited

Acién, F. G., Fernández, J. M., González, C ja Grima, E. M., 2010. Microalgae production costs. AquaFUELS Round Table, Brussels. Kättesaadav: [http://www.aquafuels.eu/attachments/066_Presentation%20-%20G.%20Acien%20\(University%20of%20Almeria\)%20-%20Microalgae%20production%20costs.pdf](http://www.aquafuels.eu/attachments/066_Presentation%20-%20G.%20Acien%20(University%20of%20Almeria)%20-%20Microalgae%20production%20costs.pdf) (Viimati vaadatud: 17.05.015)

Eesti Gaas, 2015. Kliendile. Maagaasi hind. Maagaasi hind alates 01.01.2015. Tallinn. Kättesaadav: <http://www.gaas.ee/maagaasi-hind-alates-01-01-2015/> (Viimati vaadatud: 17.05.2015)

Energiatalgud, 2014. Elektrimajandus. Elektri hind lõpptarbijale. Kättesaadav: http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=Elektri_hind_1%C3%B5pptarbijale (Viimati vaadatud: 17.05.2015)

Kask, Ü., 2010. Olemasolev olukord biogaasi tootmises. Eesti aruanne. Biometaan mootorikütuseks. Tallinna Tehnikaülikool, Soojustehnika instituut. Kättesaadav: http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/1/17/Kask,%C3%9C.%C3%9C.Olemasolev_olukord_biogaasi_tootmises._Biometaan_mootorik%C3%BCtuseks.pdf (Viimati vaadatud: 16.05.2015)

Maksu- ja Tolliamet, 2015. Tööandjale. Maksumäärad 2015. aastal. Tallinn. Kättesaadav: <http://www.emta.ee/index.php?id=35954> (Viimati vaadatud: 17.05.2015)

- Statistikaamet, 2015. Statistika. Valdkonnad. Majandus. Palk ja tööjõukulu. Valmistabelid. Keskmise brutokuupalk ja brutotunnipalk, kvartal. Tallinn. Kättesaadav: <http://www.stat.ee/36716> (Viimati vaadatud: 17.05.2015)
- Tartu Veevõrk, 2015. Hinnad. Veevarustuse ja heitvee ärajuhtimise hinnakiri. Kättesaadav: <http://www.tartuvesi.ee/veevarustuse-ja-heitvee-arajuhtimise-hinnakiri-1102014> (Viimati vaadatud: 17.05.2015)
- Värnik, R., Oper, L. ja Prants, J., 2010. Bioenergia valdkonna arendamise majanduslikud aspektid. Eesti Maailikool Tartu. Kättesaadav: <http://www.slideserve.com/tuvya/bioenergia-valdkonna-arendamise-majanduslikud-aspektid> (Viimati vaadatud: 15.05.2015)

BIOGAS PRODUCTION POTENTIAL FROM MICROALGAE IN ESTONIA

Birgit Kena

SUMMARY

Expanding population and a desire for a greater standard of living causes increase of energy use. The current energy economy still relies largely on the use of fossil fuels. But these non-renewable energy resources are limited. Thus, to avoid the energy crisis and reduce greenhouse gas emissions which cause global climate changes there is a need to use more alternative and environmentally friendly renewable energy resources. Therefore fast-growing microalgae have received considerable interest as a potential feedstock for producing sustainable biofuels. It is considered that biogas production via anaerobic digestion is the most direct way of energetic usage of microalgae.

The aim of this master thesis was to give an overview of technology of photoautotrophic microalgal cultivation, harvesting and conversion into biogas and factors which affect these processes. In addition to analyze the potential of algae technology application in Estonia: feasibility and profitability analysis in order to assess the feasibility and techno-economic aspects to produce biogas from microalgae. For that descriptions in the overview and collected data were used.

Climate conditions, CO₂ and nutrient availability, water resources and land usage/growth location selection affect the productivity of photoautotrophic microalgae. Sunlight and air temperature are the most important climate factors which affect the cultivation of microalgae in Estonia. Parameters analysis showed that it would be suitable for the cultivation of microalgae in the period from April to September. Where average temperature is higher, there is more sunshine hours, and total solar radiation amount is greater than the yearly average.

The microalgal productivity is also influenced by cultivation systems. The most common used cultivation systems are raceway ponds, tubular and plate photobioreactors. In this work the respective systems microalgal production cost was also found. Production costs for three systems were 10,79€ per kg, 7,62€ per kg and 9,96€ per kg respectively. However, taking into account the climatic conditions in Estonia, it would be necessary for year-round algal cultivation in greenhouses with heating during the colder months. However, the

implementation of the technology would increase production costs and reduce the economic feasibility. So it would make a sense to grow microalgae in photobioreactors in the warmer half of year.

Due the high production cost microalgal and algal fuels have not arrived as a large-scale manufacturing and then more attention is attracted microalgae growing integration of industrial production which waste streams can be used capturing necessary resources. In this way is also possible to save on the cost of production. Thus, Tartu Wastewater Treatment plant was taken as a template such a solution where in addition to waste water treatment biogas from sewage sludge is produced. By integrating microalgae cultivation with this complex, it is possible to capture CO₂ which comes from biogas combustion in this plant and also waste water can be used as a medium. Also produced biomass can be used in biogas production.

The calculations were performed and it was found that when biogas plant produces 3,800 m³ of biogas per day, around 6.8 tons of CO₂ is emitted and it is possible to avoid 2,463€ pollution charges annually. This biomass is able to produce 1,900 m³ of biogas per day and annual plant's biogas yield increases 25%. In addition carbon-neutral system was studied and it was found that algal biomass 7.6 tons per day would capture 13.7 tons of CO₂ per day. Thus, annual pollution charge saving can be 4,925€ But as algal cultivation period is only 180 days a year, then carbon-neutral system period is the same. Respective algal biomass can produce 3,800 m³ of biogas per day, there for annual biogas yield would increase by 49%.

As third alternative possibility the situation where microalgae constitute 12% of the total fermentable substrate, was analyzed. In this case it is possible to cultivate 1.6 tons of algae per day which will capture 2.9 tons of CO₂ per day and it is able to save 1,057€ annually from pollution charges. Also it can be produce 816 m³ of biogas per day from cultivated daily algal biomass and as a result annual biogas yield would increase by 11%. Even though this technological approach of integrated system would be conceivable alternative solution, the real implementation of the integrated system requires the technologies connection, processes improvement and understanding, economic and energetic optimization, etc.

In conclusion it can be suggested that the most effective and sustainable method for cultivating microalgae and producing biogas from it would be cultivation of microalgae integrated with wastewater treatment and biogas plants. Thus, the potential of biogas production from microalgae in integrated system conditions is considerable and realistically

applicable and it would be justified to develop this ecotechnologic field. The implementation of this technology would be of importance in the Estonian energy sector, as well as climate change.

LISAD

Lisa 1. Kuluanalüüsiks kasutatud parameetrid.

Parameeter	Väärtus	Ühik	Allikas
Elektrienergia hind	0,09	€kWh	Energiatalgud, 2014
Tööjõukulud:			
<i>Töötasu (brutopalk)</i>	6,35	€h	Statistikaamet, 2015
<i>Töötajate arv</i>	3	inimest/ha/päevas	Acién jt, 2003; Acién jt, 2010
<i>Töötunnid ööpäevas 1 in kohta</i>	8	h	-
<i>Palga üldkulud (sotsiaalmaks ja töötuskindlustusmaks)</i>	33,8	% palgast	Maksu- ja Tolliamet, 2015
Hooldus	4	% põhiseadmetest	Grima jt, 2003
CO ₂ maksumus	0,34	€kg	Norsker jt, 2011
Toitelahuse maksumus	0,44	€kg	Acién jt, 2010; Norsker jt, 2011
Seadmed ja maksumused	-		Norsker jt, 2011
Kasvuhoone kütmissüsteem	16	€m ²	Besuijen, 2014
Kasvuhoone jahutussüsteem	9	€m ²	Besuijen, 2014
Kasvuhoone sirmid	10	€m ³	Besuijen, 2014
Kasvuhoone kontrollsüsteem	2	€m ²	Besuijen, 2014
Kasvuhoone konstruktsioon	31	€m ²	Besuijen, 2014
Elektrienergia nõudlus kasvuhoone töötamiseks	7	kWh/m ² aastas	Besuijen, 2014
Gaasikulu aastas (kütmiseks)	26	m ³ /m ² aastas	Besuijen, 2014
Gaasi hind	0,38	€m ³	Eesti Gaas, 2015
Kogu kasvatamisala pindala	1,25	ha	Norsker jt, 2011
Infrastruktuuri, seadmete eluiga	30	a	Acién jt, 2003
Fotobioreaktorite torude, plaatide eluiga	1	a	Norsker jt, 2011
Mikrovetikate produktiivsus ringvoolukanalis	21	t/ha/a	Norsker jt, 2011
Mikrovetikate produktiivsus torujas fotobioreaktoris	41	t/ha/a	Norsker jt, 2011
Mikrovetikate produktiivsus plaatjas fotobioreaktoris	64	t/ha/a	Norsker jt, 2011

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Birgit Kena,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose:

„Mikrovetikatest biogaasi tootmise potentsiaal Eestis“,

mille juhendaja on Kaido Soosaar ja kaasjuhendaja Antti Roose,

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 19.05.2015