EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Martin Sein

PÖÖRLEV BIOKILE-REAKTOR MIKROVETIKATE KASVATAMISEKS REOVEEPUHASTUSES

ROTATING BIOFILM REACTOR FOR MICROALGAL GROWTH IN SEWAGE TREATMENT

Magistritöö
Energiakasutuse õppekava

Juhendaja : Lara Podkuiko, *MSc*

Tartu 2015

LÜHIKOKKUVÕTE

Sein, M. Pöörlev biokile-reaktor mikrovetikate kasvatamiseks reoveepuhastuses. – Tartu: EMÜ, 2015. 47 lehekülge, 19 joonist, 5 tabelit, A4 formaat. Eesti keeles.

Käesoleva töö eesmärk on uurida võimalust reoveekäitlusjaamade energiakulude kokku hoidmiseks. Tavalises reoveekäitlusjaamas kasutatakse aktiivmuda protsessi, et eemaldada reoveest liigsed orgaanilised ühendid. Sellest tulenevalt on vaja biokäitlusbasseine aereerida ning selleks võib kuluda üle 50 %-i kogu jaama energiakulust. Selle vähendamiseks on võimalik kasvatada koos bakteritega mikrovetikaid.

Töö käigus uuritakse eelnevalt tehtud teadustöid, milles on katsetatud erinevaid bioreaktoreid eesmärgiga puhastada reovett, kasutades selleks mikrovetikaid. Kogutud informatsiooni põhjal konstrueeritakse probleemi lahenduse uurimiseks biokile-reaktor, mis on sobilik integreerimiseks reoveepuhastusjaamadega. Biokile-reaktori kohta tehakse kavand ja arvutused, mille järgi ehitatakse reaktori pilootseade valmis. Lisaks tehakse konstrueeritud bioreaktoriga katsetusi.

Biokile-reaktoriga katsetati biokile moodustamiseks kahte materjali – puuvillast riiet ja puuvillast nööri. Katsetuste käigus leiti, et biomassi juurdekasv pindala kohta päevas oli keskmiselt vastavalt puuvillase riidetüki ja puuvillase nööri kohta 1,8 $g \cdot m^{-2} \cdot päev^{-1}$ ja 12,683 $g \cdot m^{-2} \cdot päev^{-1}$. Katsetest selgus, et puuvillane nöör sobib paremini reovee puhastamiseks antud biokile-reaktori puhul.

Märksõnad: biokile-reaktor, reovee puhastus, mikrovetikad, alalisvoolumootor, pöörlevad silindrid, pulsilaiusmodulatsioon.

ABSTRACT

Sein, M. Rotating biofilm reactor for microalgal growth in sewage treatment. – Tartu: EMÜ, 2015. 47 pages, 19 figures, 5 tabels, A4 format. In Estonian language.

The aim of this thesis is to investigate the possibility of energy consumption reduction in sewage treatment plants. In common sewage treatment plants active sludge is used to remove organic matter from sewage. Because the bacteria used in the process are mostly aerobic, active sludge tanks must be aerated. The energy for aeration can exceed 50 % of the whole energy consumption of sewage treatment plants. To reduce energy consumption, microalgae can be used.

Based on information collected from research papers adressing algae biofilm-reactors for wastewater treatment, a biofilm-reactor is constructed, which can be integrated with existing wastewater treatment systems. A draft and calculations are made for the reactor, which are used to construct the reactor. Additionally, tests are made using two different cover materials to study biofilm formation.

Of the two cover-materials tested, cotton cord showed a larger biomass growth – 12,683 $g \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ compared to 1,8 $g \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ biomass growth on cotton cloth. Therefore cotton cord has more potential as a cover material for biofilm systems..

Keywords: biofilm-reactor, sewage treatment, microalgae, DC motor, rotating cylinders, pulse-width modulation.

SISUKORD

LÜHENDID JA TÄHISED 6

SISSEJUHATUS 8

1. REOVEE KÄITLEMINE 10

1.1. Reovee töötlusprotsessi etapid 10

1.1.1. Reovee mehaaniline puhastus 10

1.1.2. Reovee bioloogiline puhastus 11

1.2. Puhastatud reoveele kehtivad nõuded 13

1.3. Mikrovetikate kasutamine reoveepuhastuses 13

2. MIKROVETIKAD 15

2.1. Mikrovetikate iseloomustus 15

2.2. Süsihappegaas 16

2.3. Valgustihedus 16

3. VETIKAREAKTORID REOVEEPUHASTUSES 18

3.1. Harjastega bioreaktor 18

3.2. Läbivoolutorudega bioreaktor 19

3.3. PBK reaktorid 20

3.3.1. Pöörlevate silindritega biokile vetikareaktor 21

3.3.2. Pöörlevate ketastega biokile-vetikareaktor 22

3.4. Katsetatava reaktori valik 23

4. REAKTORI EHITUS 24

4.1. Reaktori konstruktsiooniline lahendus 24

4.2. Reaktori ajami arvutus 25

4.3. Mootori kiiruse reguleerimine 33

5. REAKTORI KATSED 36

5.1. Katsete ülesehitus 36

TULEMUSED JA ARUTELU 38

KOKKUVÕTE 43

KASUTATUD KIRJANDUS 44

SUMMARY 47

LISAD 48

LISA A. Heitvee reostusnäitajate piirväärtused ja reovee puhastusastmed 49

LISA B. Pulsilaiusmodulatsiooni joonised 50

Lihtlitsents 52

LÜHENDID JA TÄHISED

A	–	veega kokkupuutuv silindri pindala
BHT	–	biokeemiline hapnikutarve
b	–	silindri ümbermõõt
C_v	–	veega kokkupuutuva pinna hõõrdekoefitsient
D_1	–	silindri välimine diameeter
D_2	–	silindri sisemine diameeter
d_1	–	vedava võlli diameeter
d_2	–	mootori võlli diameeter
F_g	–	raskusjõud
F_L	–	laagritele mõjuv raskusjõud
F_v	–	ülekanderihmade poolt tekitatud raskusjõud
F_{ve}	–	vee hõõrdejõud
$F_ü$	–	üleslükkejõud
g	–	raskuskiirendus
I	–	inertsimoment
ie	–	inimekvivalent
KHT	–	keemiline hapnikutarve
l	–	silindri pikkus
M_k	–	kogu pöördemoment
M_L	–	hõõrdemoment
M_m	–	mootori pöördemoment
M_p	–	töömasina pöördemoment
m	–	silindri mass
m_n	–	biomasside keskmine puuvillase nööri peal
m_{n1}	–	biomassi juurdekasv pindala ühiku kohta puuvillase nööri katses
m_p	–	keskmine biomass puuvillase riidetüki katses
m_{pt}	–	biomassi juurdekasv pindala ühiku kohta puuvillase riidetüki katses
n	–	töömasina pöörlemiskiirus

n_1	–	silindri pöörlemiskiirus
n_2	–	mootori pöörlemiskiirus
$\eta_{ü}$	–	ülekande kasutegur
P	–	elektrimootori kogu mehaaniline võimsus
PBK	–	pöörlev bioloogiline kontaktor
P_{pL}	–	pöördemomendist ja hõõrdemomendist tulenev mehaaniline võimsus
P_v	–	vee hõõrdejõu ületamiseks vajalik mehaaniline võimsus
ppm	–	osakest miljoni kohta (*ingl. k. parts per million*)
r	–	silindri raadius
S	–	silindri pindala, mis puutub kokku vedelikuga
S_n	–	puuvillase nööri pindala
S_p	–	puuvillase riidetüki pindala
t	–	pöörlemiskiiruse saavutamiseks kuluv aeg
V	–	silindri ruumala
v	–	liikumiskiirus
a	–	nurkkiirendus
ρ	–	vee tihedus
ω	–	nurkkiirus

SISSEJUHATUS

Inimkonna parema elukvaliteedi tagamisega kaasneb ka suurem vee tarbimine, mille tulemusena kasvab reoveekäitlusjaamade reostuskoormus. Reovett on vaja töödelda, kuna kõrge fosfori- ja lämmastikusisaldusega olmeheitvee juhtimine looduslikesse veekogudesse põhjustab veekogude eutrofeerumist [1].

Reoveekäitlusjaamades kasutatakse fosfori ja lämmastiku bioloogiliseks eemaldamiseks reoveest aeroobset käitlemist ehk nn aktiivmudaprotsessi, mille eesmärgiks on tekitada reoveepuhasti selline väljavool, mis vastaks puhastatud reoveele kehtivatele standarditele. Protsessis kasutatakse peamiselt aeroobseid baktereid, kes oma elutegevuses kasutavad orgaanilisi ühendeid ning seovad biomassi lämmastik- ja fosforiühendeid. Bakterite elutegevuseks vajalik hapnik tagatakse pideva aereerimise käigus. Seetõttu vajavad hetkel kasutuses olevad reoveetöötlusprotsessid palju energiat, mille tulemusel reostatakse keskkonda [1]. Tüüpilises reoveekäitlusjaamas, kus kasutatakse mehaanilist aereerimist, moodustab aereerimise energiakulu ligikaudu 0,6 $kW \cdot h \cdot m^{-3}$ [2], mis võib olla üle 50 % jaama kogu energiakulust [3].

Energiakulude vähendamiseks on võimalik kasutada mikrovetikaid, kuna vetikate elutegevuse käigus eralduv hapnik aitaks vähendada vajadust aereerimise järele. Lisaks on vetikad võimelised siduma suurel hulgal lämmastiku- ja fosforühendeid, mis muudaks bioloogilise käitluse kiiremaks ja efektiivsemaks. Mikrovetikad kasutavad bakterite elutegevuse käigus eraldunud süsihappegaasi süsiniku allikana [4], talletades selle orgaaniliste ühenditena (suhkrud, tärklised, lipiidid), mida on võimalik kasutada nii energiaallikana (biogaas) kui ka väetistena.

Erinevalt bakteritest vajavad vetikad kasvamiseks valgust. Paraku on biokäitlusbasseinid liiga sügavad vetikate kasvatamiseks, kuna valgus suudab tungida läbi tiheda kultuuri vaid mõni sentimeeter. Üheks võimalikuks lahenduseks vetikate kasvatamiseks tavalistes käitlusbasseinides on bioreaktorite kasutamine. Bioreaktorite tüüpe on erinevaid ning kõik ei sobi olemasolevate reoveekäitlusjaamadega integreerimiseks.

Antud töö eesmärgiks on uurida võimalikke lahendusi, kuidas kasutada mikrovetikaid reovee puhastamisel. Selleks uuritakse erinevate reaktorite tööpõhimõtteid ja efektiivsust puhastusprotsessis ning selle põhjal selgitatakse välja parim reaktor, millega oleks võimalik

katsetada mikrovetikate potentsiaali olmereovee töötlusprotsessis. Uuritud andmete põhjal konstrueeritakse ka sobilik reaktor.

Autor on tänulik Eesti Maaülikoolile töö käigus ehitatud reaktori rahastamise eest.

Martin Sein avaldab tänu Lara Podkuikole teema valiku eest ning lõputöö juhendamise eest.

1. REOVEE KÄITLEMINE

1.1.Reovee töötlusprotsessi etapid

Linnades ja suuremates asulates juhitakse tekkinud reovesi mööda kanalisatsioonitorustikke ja ülepumpamisjaamasid reoveepuhastisse. Näiteks Tartus on selleks Tartu Veevärgi reoveepuhastusjaam. Reovee puhastamine toimub keemiliste, füüsikaliste ja bioloogiliste etappide kaudu, peamisteks etappideks on mehaaniline puhastamine ja bioloogiline puhastamine [5]. Kui mehaaniline protsess on suhteliselt kindlalt piiritletud, siis bioloogilise protsessi puhul on erinevaid võimalusi reovett puhastada mitmeid. Bioloogilise puhastuse korral kasutatakse aktiivmuda. Protsessi erinevused seisnevad kasutatavate seadmete eripärasustes ning mahutite suuruses ja kujus.

1.1.1. Reovee mehaaniline puhastus

Reovee mehaaniline puhastus koosneb erinevatest püünistest, filtritest ja setitist. Mehaanilise puhastuse eesmärk on puhastada reovesi enne bioloogilist puhastusprotsessi hõljuvainest, liivast, ujuprahist jne. Mehaanilise protsessi osa on tähtis, kuna mehaanilise puhastusprotsessi käigus eemaldatakse ligi 2/3 hõljuvainest, mis tagab edasiste seadmete tõrgeteta töö. Protsessi käigus kasutatakse füüsikalisi võtteid [5].

Mehaaniline reovee puhastamine algab võrega. Reovesi juhitakse kõigepealt läbi kaldu või vertikaalselt paigaldatud varraste, mille vahe võib olla 3 – 20 mm. Selle abil eemaldatakse kõige suurem praht (kaltsud, puutükid), sest see võib seadmeid (pumbad, aeraatorid) rikkuda [5].

Puhastamise järgmiseks etapiks on liivapüünis. Liivapüünist kasutatakse eesmärgiga eemaldada reoveest raskem materjal (liiv). Liivapüünis on suur mahuti, mida aereeritakse, et tekitada vee kruvitaoline liikumine. Selline liikumine aitab kaasa liiva ja ka raskemate mineraalide settimisele liivapüünise põhja. Lisaks paigaldatakse liivarenni põhja pihustid, millesse juhitakse perioodiliselt surve all pesuvesi, et tekkinud raskem materjal juhtida automaatselt liivapüünise ühte otsa kokku. Liiv kuivatatakse ja taaskasutatakse [5].

Mehaaniline reovee puhastus lõppeb setitis, mida nimetatakse ka eelsetitiks, kuna see on protsess, mis eelneb bioloogilisele reovee puhastusetapile. Lihtsamates puhastusjaamades kasutatakse suurt mahutit, millesse juhitakse perioodiliselt puhastatav reovesi. Reoveel lastakse seista ning teatud aja möödudes juhitakse reovesi edasi bioloogilisse puhastusprotsessi. Tekkinud muda kõrvaldatakse mahuti põhjast [5].

Üldjuhul jagatakse setitid vee liikumissuuna järgi horisontaalseteks, radiaalseteks ja vertikaalseteks. Horisontaalsed ja radiaalsed setitid on kasutusel suuremates puhstusjaamades, mis on varustatud põhja vajunud setet eemaldavate mehhanismidega. Väikepuhastites kasutatakse tavaliselt vertikaalsetiteid, mille põhi on kooniline ja järsu kaldenurgaga (≥60°) [5].

1.1.2. Reovee bioloogiline puhastus

Reovee bioloogilise puhastuse saab jagada samuti kahte rühma – biokileprotsess ja aktiivmudaprotsess. Bioloogilise protsessi eesmärgiks on orgaaniliste ainete oksüdeerimine ja kolloidsete hõljumisosakeste sorbeerimine biomassi, et neid saaks eraldada setitamise ja flotatsiooni abil.

Biokile protsessis kinnituvad mikroobid täiteainele või tahketele pindadele. Mida kiiremini tekib biokile, seda suurem on protsessi efektiivsus. Biokile all mõistetakse mikroorganisme, kes toituvad reovees esinevatest orgaanilistest ainetest ning moodustavad pindadele limajat pealiskasvu. Enamlevinud biokilereaktorid on biofilter ja biorootor [5], mida kutsutakse ka PBK-ks, ehk pöörlevaks bioloogiliseks kontaktoriks [6]. Siinkohal tasub märkida, et enamasti kasutatakse sarnaseid mikroorganisme, nagu ka aktiivmudaprotsessi puhul, kes tarbivad hapnikku oma elutegevuse käigus.

Aktiivmudaprotsessis kasutatakse suuri aeratsiooni- ehk aerotanke, milles elutsevad mikroorganismid, mis moodustavad nn aktiivmuda. Aeratsioonitanki lisatakse pidevalt hapnikku läbi pihustite. Seda on vaja, et tagada bakteritele vajalik elukeskkond. Tänu aeratsioonile on reovesi aerotankis pidevalt liikumises, mistõttu ei setti biomass aeromahuti põhja. Aerotankist suunatakse reovesi koos biomassiga settimiskambrisse, mida nimetatakse järelsetitiks, et tekkinud biomass setitada settekambri põhja. Sellest mahutist eemaldatakse osa muda, mis viiakse edasisele töötlusele ning osa muda pumbatakse tagasi aerotanki, et hoida mahutis biomassi kontsentratsiooni kõrgel. Aerotankis hoitakse võimalikult suurt

biomassi kontsentratsiooni, et protsess oleks võimalikult kiire, aga samas peab see kontsentratsioon olema piisavalt madal, et mass ei hakkaks settima aerotanki põhja [5]. Aktiivmudaprotsesse on erinevaid ning neid kohandatakse vastavalt reoveepuhastusprotsessi iseloomustavate tingimuste põhjal. Tabelis 1.1 on toodud peamised aktiivmudaprotsessid ning nende iseloomustus.

Tabel 1.1. Aktiivmudaprotsesside kirjeldus [5]

Protsessi nimi	Kirjeldus
Tavapärane väljatõrjerežiim	Aktiivmuda suunatakse aerotanki algusesse, kus see segatakse surve- või mehaaniliste õhutitega. Aerotanki aereeritakse terve mahuti ulatuses ühtlaselt
Kestuvpuhastus	Sarnaneb väljatõrjerežiimiga, kuid puhasti töötab endogeense respiratsiooni režiimis, mis tähendab, et aerotanki BHT koormus on väike, aga viibeaeg pikk. Valmistatakse kompaktsete väikepuhastitena.
Ringkanal	Koosneb rõngakujulisest ovaalsest kanalist. Kanalis voolab reovesi kiirusega 0,25 – 0,35 $m \cdot s^{-1}$.
Oksütank – protsess	Aktiivmudasegu aereeritakse puhta hapnikuga. Mahuti on pealt kinnine ning bakterite poolt kasutamata hapnik läheb uuesti ringlusesse. Osa aerotankis vabanevast gaasist lastakse välja, et vabaneda süsihappegaasist.
Sügavkaevreaktor	Eelsetiti ja aerotanki asemel on sügav (120 – 150 m) püstkaev, mis on vooderdatud teraskestaga ja varustatud kontsentrilise toruga, et moodustuks rõngakujuline reaktor. Aktiivmudasegu ja õhk juhitakse mööda kesktoru ja tõuseb üles mööda seda ümbritsevat rõngasruumi.

Tabelist on näha, et peamiselt kasutatakse ikkagi suuri mahuteid selleks, et kasvatada aktiivmuda. Kuigi on olemas ka kaevreaktorid (nagu ka sügavkaevreaktor), ei ole need laialt levinud.

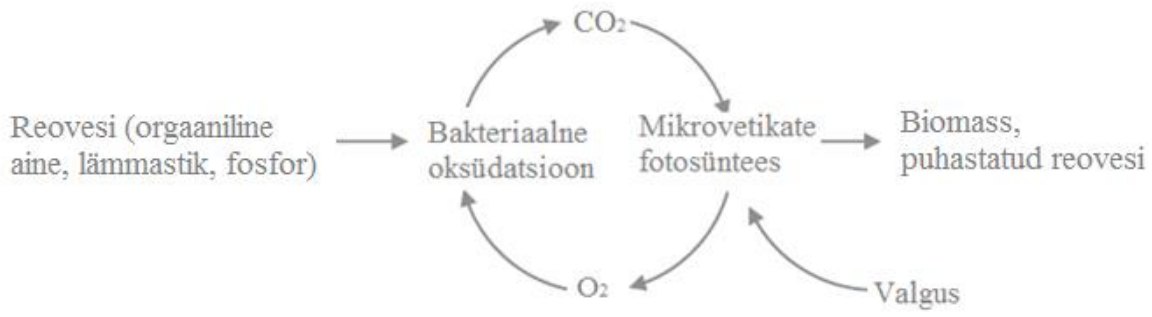
1.2. Puhastatud reoveele kehtivad nõuded

Eesti Vabariigis kehtivad reovee puhastamise ning heit- ja sademevee suublasse juhtimise kohta täpsed piirväärtused ja puhastusastmed. Lisas A on toodud Eesti Vabariigi valitsuse poolt välja antud „Reovee puhastamise ning heit- ja sademevee suublasse juhtimise kohta esitatavad nõuded, heit- ja sademevee reostusnäitajate piirmäärad ning nende nõuete täitmise kontrollimise meetmed“ määruses asuv lisana 1 kehtivad heitvee reostusnäitajate piirväärtused ja reovee puhastusastmed [7]. Tabelist on näha, et alla 300 ie reostuskoormusega reoveekäitlusjaamadele ei kohaldata üldfosfori ja üldlämmastiku suublasse juhtimiseks piirväärtusi. Inimekvivalent (ie) tähendab ühe inimese poolt põhjustatud keskmist ööpäevast veereostuskoormust. Selle abil saab võrrelda reostuskoormusi.

1.3. Mikrovetikate kasutamine reoveepuhastuses

Lisas A asuvast tabelist on näha, et üheks tähtsaimaks puhastatud reovee puhastusastme näitajaks on üldfosfori ja üldlämmastiku sisaldus. Nende ainete eemaldamise vajadus tuleneb peamiselt sellest, et nad põhjustavad veekogude liigtoitelisust, mille üheks ilminguks on vetikaõitsengud. Liigtoitelisuse ehk eutrofeerumisega kaasneb madal lahustunud hapniku sisaldus või anoksia, pH muutus, tsüanotoksiinide ja teiste vetikamürkide tekkimine ja akumuleerumine ning massiline kalade surm. Äärmuslikul juhul võib veekogu kinni kasvada [1].

N ja P eemaldamiseks reoveest kasutatakse baktereid, kes tarbivad oma elutegevuse käigus hapnikku. Selle tagamiseks kulubki suur osa reoveekäitlusjaama energiast. Tüüpilises reoveekäitlusjaamas on energiakulu ligikaudu 0,6 $kW \cdot h \cdot m^{-3}$ [2]. Näiteks Erala reoveepuhasti, mille koormus on 1000 inimest ja vooluhulk 130 m^3 päevas [18], on energiatarve 0,6 $kW \cdot h \cdot 130\ m^3\ päev^{-1} = 78\ kW \cdot h\ päev^{-1}$. Mikrovetikate kasvatamisega on võimalik tagada bakteritele vajalik hapnik, misläbi saab hoida kokku ka aereerimiseks kuluvat energiat. Bakterite elutegevuse käigus vabaneb süsihappegaas. Kuna mikrovetikad kasutavad süsihappegaasi süsinikuallikana fotosünteesimisel, on võimalik neid integreerida selle bioloogilise protsessiga. Protsessi illustreeriv joonis on toodud joonisel 1.1 [3].



Joonis 1.1. Mikrovetikate integreerimine reoveepuhastuses kasutatavate bakteritega [3]

Bakterid ja mikrovetikad kasutavad oma elutegevuse käigus reovees sisalduvaid aineid. Bakterite elutegevuse tagajärjel vabaneb süsihappegaas, mida kasutavad mikrovetikad. Mikrovetikate fotosünteesil vabaneb omakorda hapnik, mida kasutavad bakterid. Seetõttu saab reovee puhastamisel rakendada bakter-vetikas süsteemi. Protsessi saadusteks on puhastatud reovesi ja biomass. Kuna mikrovetikad vajavad elutegevuseks valgust, ei saa neid aga kasvatada aktiivmudabasseinides, kuna valgus ei suuda kõrge hõljuvaine kontsentratsiooni tõttu tungida kuigi sügavale ja valguspuudus hakkaks vetikate kasvu kiirelt limiteerima. Lahenduseks on aktiivmudabasseinidega integreeritavate biokile-reaktorite kasutamine.

Kõige keerulisem on eemaldada reoveest fosforit, kusjuures fosfori eemaldamiseks võidakse kasutada ka keemilisi meetodeid, mis sadestavad väljavoolava vee hulgast fosfori lahustumatuks fraktsiooniks. Sagedamini kasutatakse siiski bioloogilist eemaldamist, mis hiljem moodustab jääkmuda [8].

2. MIKROVETIKAD

2.1. Mikrovetikate iseloomustus

Mikrovetikad on mikroskoopilised ainuraksed organismid, kellel toimuvad samasugused fotosünteetilised protsessid, nagu kõrgemate taimede puhul. Looduses esineb üle 36 000-nde erineva mikrovetikaliigi [4]. Enamus nendest liikidest elutseb vees. Hinnanguliselt pärineb ligi 50 % atmosfääri hapnikust mikrovetikate elutegevusest ookeanides. Lisaks on nad pea kõikides vee-ökosüsteemides primaarprodutseerijateks, olles toiduahelate esmaseks lüliks. Mikrovetikates akumuleeruvad lipiidid, millel on madalam tihedus kui veel, mis aitab neil vee peal hõljuda. Tänu sellele on neil ligipääs valgusele, mistõttu saavadki nad fotosünteesida. Mikrovetikad on võimelised oma massi kahekordistama ööpäevaga, mõnel juhul isegi 3,5 tunniga [4].

Vetikad talletavad lipiidides süsinikku, mis pärineb süsihappegaasist. Süsihappegaasist saadava süsiniku konverteerivad nad süsinikuks, kasutades selleks valgust. Erinevate vetikaliikide koostis on väga erinev, mis tähendab, et vetikaliigi valik on väga oluline kindlatel eesmärkidel. Tabelis 2.1 on toodud erinevate vetikaliikide koostis protsentides kuiva massi kohta [4].

Tabel 2.1. Erinevate vetikaliikide üldine koostis kuiva massi kohta protsentides [9]

Mikrovetikaliik	Proteiin	Süsivesikud	Lipiidid
Anabaena cylindrica	43–56	25–30	4–7
Aphanizomenin flos-aquae	62	23	3
Chlamydomonas rheinhardii	48	17	21
Chlorella pyrenoidosa	57	26	2
Chlorella vulgaris	51–58	12–17	14–22
Dunaliella salina	57	32	6
Euglena gracilis	39–61	14–18	14–20
Porphyridium cruentum	28–39	40–57	9–14
Scenedesmus obliquus	50–56	10–17	12–14
Spirogyra sp.	6–20	33–64	11–21
Arthrospira maxima	60–71	13–16	6–7
Spirulina platensis	46–63	8–14	11
Synechococcus sp.	63	15	11

Tabelist on näha, et selgelt eristub teistest lipiidide sisalduse poolest *Chlorella vulgaris.* Proteiini sisalduse poolest jääb rohkem silma *Arthospira maxima*, kuid proteiini sisalduse

suur osahulk sobib pigem mikrovetikate kasvatamiseks eelkõige toidulisandite ja loomatoitude tootmise jaoks.

2.2. Süsihappegaas

Taimed suudavad praegusest fossiilsete kütuste põletamisel vabanevast süsihappegaasi hulgast ära siduda hinnanguliselt 3 – 6% [10]. Kõigist fototroofsetest organismidest on mikrovetikate fotosünteesimise kiirus suurim, olles 10 – 50 korda tõhusam taimede fotosünteesimise efektiivsusest pinnaühiku kohta [10].

CO_2 omastamine mikrovetikate poolt on seotud mikrovetika liigist, CO_2 kontsentratsioonist, bioreaktori kavandist, operatsiooni parameetritest, valguse kättesaadavusest ning rakkude tihedusest kasvukeskkonnas. Fotoautotroofset kasvu saab kiirendada ning suurendada modifitseerides neid parameetreid.

Varasemalt on tehtud uurimustöö [4], kus on üritatud välja selgitada optimaalne süsihappegaasi kogus gaasis, mille juures mikrovetikad kasvavad kõige efektiivsemalt, kuid senini pole suudetud iga vetikaliigi kohta ühest vastust anda. Eesmärgiks on võimalikult suure kontsentratsiooni saavutamine, mille juures vetikad suudavad kiiresti paljuneda. Katseliselt on näidatud, et mikrovetikad suudavad edukalt kasvada väga kõrgete CO_2 kontsentratsioonide (5 – 100 %) juures, mistõttu ei pruugi atmosfääris sisalduv süsihappegaasi kontsentratsioon (~403 ppm ehk 0,0403 %) olla piisav vetikate maksimaalseks kasvuks [11].

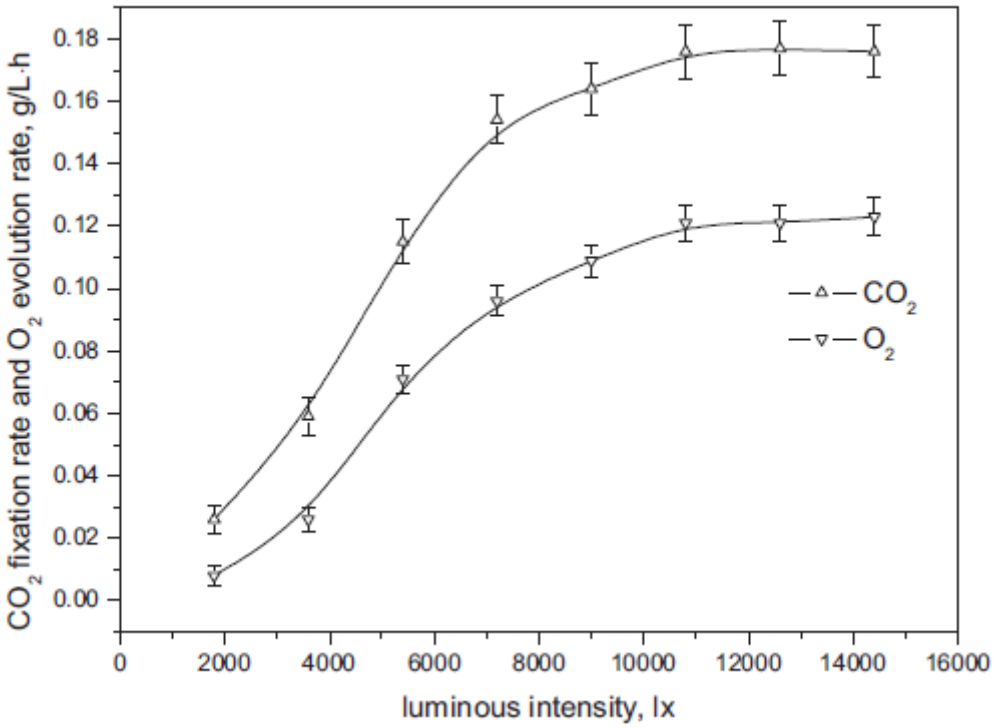
Ka reoveepuhastusel on mikrovetikate tõhusamaks kasvamiseks võimalik kasutada lisasüsihappegaasi. Sageli paiknevad reoveepuhastite läheduses aktiivmudal jms töötavad biogaasijaamad, mille toodetavast biogaasist moodustab 20 – 35 % süsihappegaas. Seda on võimalik kokku koguda ning suunata mikrovetikakasvatusse [11].

2.3. Valgustihedus

Valgutihedusest sõltub iga fotosünteetilise organismi kasvukiirus. Valgustihedus on kindlale pinnaühikule jõudev valgusvoog. See mõjutab fotosünteesi efektiivsust, CO_2 sidumise kiirust ja biomassi kontsentratsiooni. Kuigi valgustiheduse suurenemisel kasvab reeglina CO_2 omastamine, on igal fotosünteesi süsteemil küllastuspunkt, kust edasi ei too valgustiheduse

suurenemine kaasa suuremat efektiivsust, vaid võib hoopis süsteemi produktiivsust pärssima hakata [12]. Näiteks leidsid Fan jt. oma töös [13], et mikrovetika *Chlorella vulgaris* küllastuspunkt on 10800 lux-i juures (joonis 1.1.).

Joonisel 2.1 on toodud süsihappegaasi sidumise ja hapniku vabanemise sõltuvus valgustihedusest[13].



Joonis 2.1. CO_2 sidumise ja O_2 vabanemise seos valgustihedusest [13]

Kuigi küllastuspunkti võivad oluliselt muuta kultuuri tihedus, valgustsükli pikkus ja valgusallika valgusspektrite variatsioonid, annab optimaalseima valgustiheduse leidmine võimaluse kasvatada kultuuri maksimaalse kiirusega.

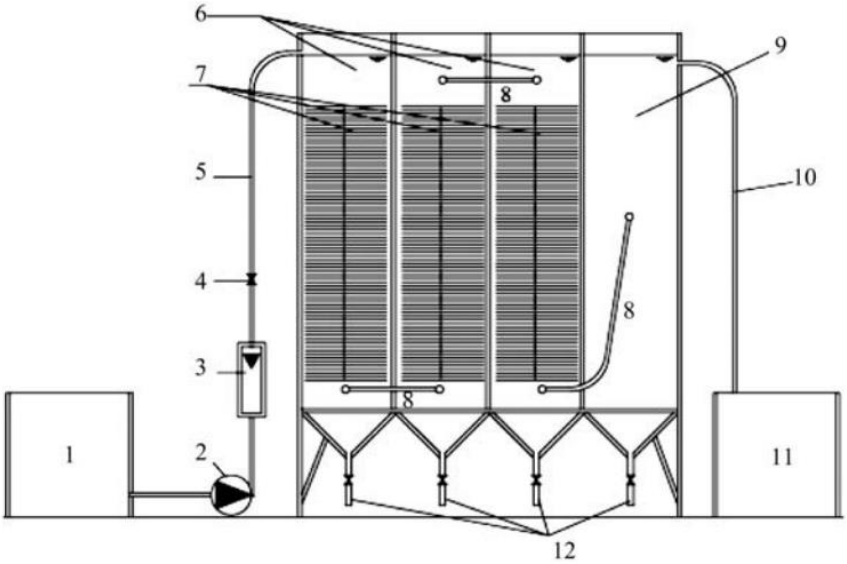
Reoveekäitlusjaamades mikrovetikate kasvatamiseks on vaja samuti võimaldada mikrovetikatele valguse juurdepääs. Kohtades, kus püsib päikesevalgus ühtlase valgustihedusega, on võimalik kasutada ära looduslikku valgust aastaringselt. Suurtel laiuskraadidel tuleb süsteemi mingi osa aastast valgustada tehislike valgusallikatega. Seetõttu on vaja välja arvutada mikrovetikate poolt kokku hoitav energiakulu ning leida, kas tasub kasutada tehislikku valgusallikat, või kasutada organisme ainult siis, kui looduslik valgustihedus on piisavalt suur.

3. VETIKAREAKTORID REOVEEPUHASTUSES

3.1. Harjastega bioreaktor

Reoveepuhastusel on vetikate kasvatamiseks katsetatud erinevaid reaktorilahendusi. Käesolevas töös kirjeldatakse harjastega reaktorit, läbijooksutorudega reaktorit ning PBK reaktoreid.

Harjastega reaktori puhul kasutatakse torude jaoks mõeldud puhastusharju [14]. Harjad paigutatakse pleksiklaasist valmistatud kambrite sisse, millest lastakse läbi reovesi. Reaktorit iseloomustav joonis on toodud joonisel 3.1.



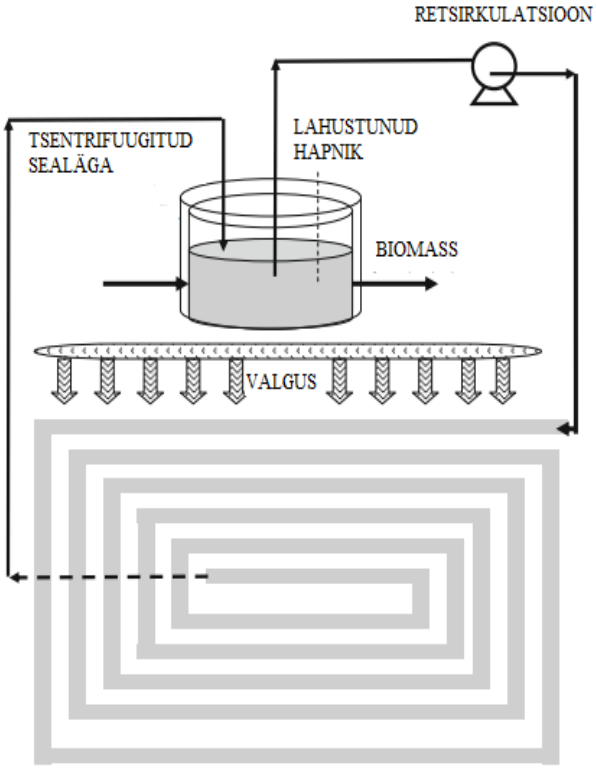
Joonis 3.1. Harjastega bioreaktori ehitus [14]. Tähistused: 1 – toitelahuse mahuti; 2 – peristaltiline pump; 3 – rotameeter; 4 – ventiil; 5 – sissevoolutoru; 6 – reaktori kambrid; 7 – toitelahus; 8 – ühendustorud; 9 – sadestuskamber; 10 – väljavoolutoru; 11 – ülejooksumahuti; 12 – mudatorud [14]

Peristaltiline pump pumpab toitelahuse mahutist reovett läbi sissevoolutoru reaktori kambritesse. Rotameeter mõõdab pumbatava reovee kogust ning reovee allavoolamise takistamiseks kasutatakse ventiili. Reaktori kambrite sees on harjased, mille sees elutsevad mikrovetikad, kes puhastavad reovett lämmastikust ja fosforist. Peale kolme harjastega

kambri läbimist liigub reovesi edasi sadestuskambrisse, kus liigne raske mass sadestub reaktori põhjas asuvasse kogumiskambrisse. Sadestuskambrist saadakse puhastatud reovesi. Antud töö autorid said tulemuseks kuue päevase katseperioodi jooksul fosfori ja lämmastiku sidumise efektiivsuseks vastavalt 98,17 % ja 86,58 %, kusjuures reovee voolukiirus oli 218,7 $mL \cdot h^{-1}$. Kuigi tulemus oli hea, ei ole selge, kas ja kuidas on sellist süsteemi võimalik integreerida praeguste reoveepuhastussüsteemidega. Lisaks ei ole antud süsteemi puhul võimalik ära kasutada juba kasutuses olevate bakterite poolt eraldatavat süsihappegaasi. Sellist reaktorit tuleb valgustada külgedelt, mistõttu ei tagaks loodusliku valguse kasutamine reaktori täielikku valgustamist.

3.2. Läbivoolutorudega bioreaktor

Läbivoolutorudega bioreaktori puhul kasutatakse pumpa, et reovett tsirkuleerida läbi pikkade torude. Torud on valmistatud läbipaistvast materjalist, et tagada mikrovetikatele vajalik valgus fotosünteesiks. Joonisel 3.2 on toodud läbivoolutorudega bioreaktor [15].



Joonis 3.2. Läbivoolutorudega bioreaktor [15]

Joonisel 3.2 on näha, et reoveemahutist tsirkuleerib reovesi läbi torude. Torud paigutatakse horisontaalselt maha. Reoveemahuti eesmärk, lisaks reovee hoidmisele, on ka fotosünteesimise käigus eraldunud hapniku eemaldamine. Liigne hapnik võib hakata sellise süsteemi efektiivsust pärssima [15].

Sellist fotobioreaktori tüüpi on kasutatud laialdaselt mikrovetikate kasvatamiseks, kuid selline süsteem ei sobi reoveepuhastussüsteemidega integreerimiseks mitmel põhjusel – reovee pumpamiseks läbi pikkade torude on vaja palju energiat, torusid on vaja aeg-ajalt puhastada ning biomassi eraldamiseks reoveest on vaja teha lisatööd.

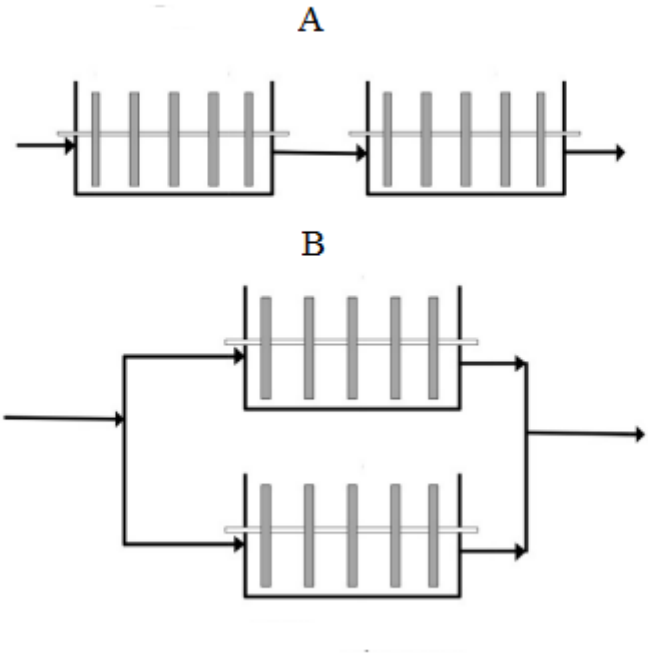
3.3. PBK reaktorid

Kõikide eelnevate reaktorite puhul, mida on siiani töös vaadeldud, on probleemseimaks kohaks see, et süsteemi on vaja aeg-ajalt puhastada. Seda seetõttu, et mikroorganismid jäävad pindadele kinni ning see võib hakata segama nii massi segamist kui ka valguse ligipääsetavust. Biokile vetikareaktor kasutab seda probleemi aga võimalusena – biokile puhul on võimalik saavutada suuremat biomassi kontsentratsiooni kui vedelkultuuri puhul, samuti on biomassi kokkukogumine lihtsam [16]. Lisaks ei ole raku viibeaeg (*ingl.k. cell residence time*) seotud hüdraulilise viibeajaga (*ingl. k. hydraulic residence time*), mis tähendab seda, et reaktoris kasutatavate orgaaniliste ühendite kogus võib olla suurem, kui tavalises bioreaktoris [17].

Pöörlevaid bioloogilisi kontaktoreid (PBK) kutsutakse veel ketas-, pind-, biokandja- kui ka biokile-reaktoriteks. PBK reaktorite pinnad on kaetud sobiva materjaliga, millele vetikad saavad kinnituda ning paljuneda. Reaktorid koosnevad ketastest või silindritest, mis on pandud osaliselt vette pöörlema. Võlli paneb pöörlema mootor. Võlli pöörlemiskiirust peab saama reguleerida mootoriga, sest sellest sõltub vetikarakkude viibeaeg toitelahuses [17].

Üldiselt jagatakse PBK reaktorid kaheks – eraldiseisvateks ja modulaarseteks. Reaktorite silindrite diameetri maksimaalne võimalik suurus on 3,5 meetrit, seetõttu on eraldiseisva biokile reaktori inimekvivalendi (ie) suurus ka väiksem. Maksimaalne võimalik suurus on piiratud seetõttu, et biokile lineaarne kiirus vee pinnal ei tohi olla liiga suur, sest see tekitab liialt suuri energiakulutusi ning reovesi ei tohi suure kiiruse tõttu laiali lennata. Samas ei tohi mikrovetikarakkude viibeaeg olla liiga pikk või lühike. Eraldiseisva reaktori ie väärtus on ≤ 250, kui modulaarsete reaktorite puhul võib olla ie≥ 1000. Modulaarsete reaktorite ie

väärtus on kõrgem, kuna neid saab süsteemi juurde lisada ja ära võtta vajaduse järgi. Reovesi voolab ühe silindri juurest järgmise juurde kas paralleelselt või jadamisi (joonis 3.3.). Tüüpilises PBK reaktoris on veealune osa umbes 40% [17].



Joonis 3.3. Modulaarsete PBK reaktorite ühendusviisid [17]. A – näidatud modulaarsete PBK reaktorite jadaühendus ja joonisel B – paralleelühendus, või ka rööpühendus.

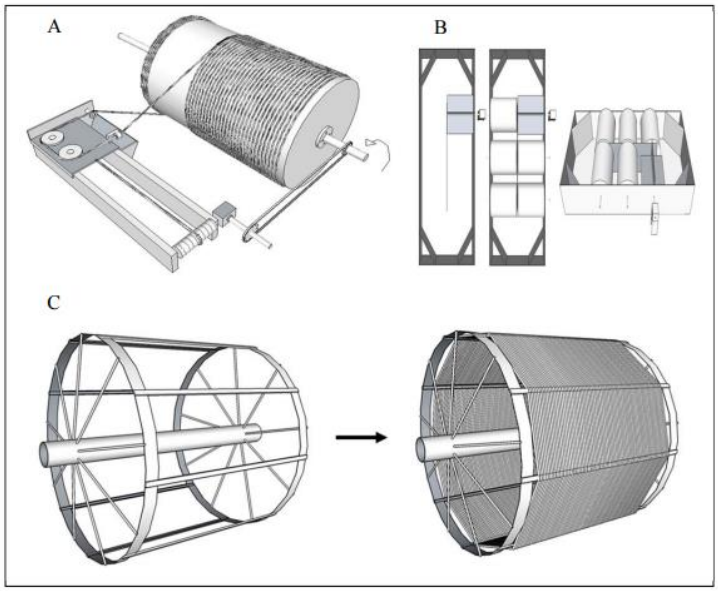
Biokile vetikareaktor on eelnevatest reaktoritest paremini integreeritav reoveekäitlusjaamadega, tema energiakulud on väiksemad ja ta võimaldab vetikatele süsihappegaasi, ilma, et seda peaks kasvukeskkonda doseerima [16]. Lisaks on seda tüüpi reaktoritega võimalik saada peaaegu kuiva biomassi, mida on võimalik biogaasistada või kompostida.

Enim on uuritud pöörlevate silindritega ja pöörlevate ketastega biokile-reaktoreid. Nende peamine erinevus on materjali valikus, mille külge vetikamass kinnitub [16].

3.3.1. Pöörlevate silindritega biokile vetikareaktor

Pöörlevate silindrite kontseptsioon näeb ette pöörlevaid silindreid, mis paigaldatakse reoveekäitlusbasseinide pinnale. Reaktor koosneb silindrist, mille pinnale on paigaldatud

materjal, mille peale mikrovetikad kinnituvad. Silinder pannakse osaliselt reovette pöörlema. Pöörlev bioloogiline kontaktor (PBK) võimaldab vetikatel kokku puutuda nii reovees olevate toitainete, süsihappegaasiga, kui ka valgusega, võimaldades samas ka biomassi kogumist. Joonisel 3.4 on toodud mikrovetikate kasvatamiseks mõeldud PBK konstruktsiooniline lahendus [6].



Joonis 3.4. Pöörlevate silindritega PBK reaktor mikrovetikate kasvatamiseks [6]

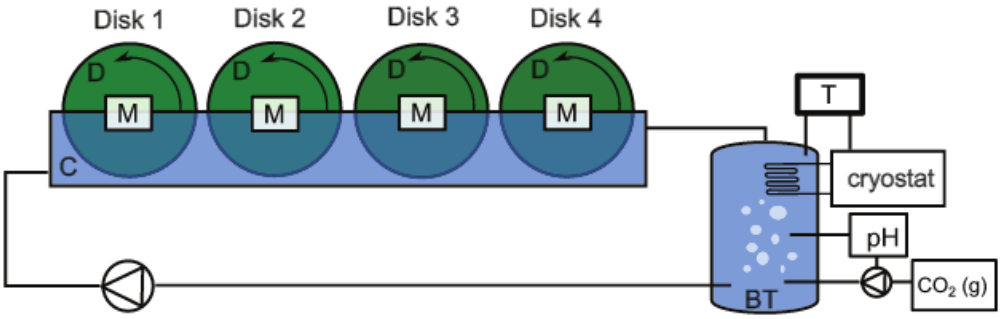
Silinder kaetakse puuvillanööri või teise materjaliga (polüester, akrüül jt) ning pannakse reovette pöörlema [6]. Nööri puhastamiseks biomassist kasutatakse liuguritel mehhanismi (joonis 3.4 A). Kui kasutatakse lamedaid materjale, siis peab süsteemi automatiseerimiseks lisama juurde kraapmehhanismi.

L. Christenson (2011) sai oma uurimustöös sellise reaktoriga biomassi juurdekasvu kiiruseks kesmiselt 31 g päev^{-1} m^{-2}. Ta kasutas avatud tiigi süsteemi integreerituna biokile reaktoriga (joonis 4.1 B). Lisaks leidis autor, et P ja N eemaldamine reoveest olid vastavalt 4,1 ja 22,1 g m^{-2} · päev^{-1}.

3.3.2. Pöörlevate ketastega biokile-vetikareaktor

Pöörlevate ketastega biokile-reaktor on oma põhimõttelt sarnane pöörlevate silindritega biokile-reaktoriga, kuid silindrite asemel kasutatakse õhukesi kettaid. Enamasti paiknevad kettad maa suhtes vertikaalasendis [16]. See võib olla problemaatiline, kuna looduslik

päikesevalgus on raskemini ligipääsetav kultuurile. Süsteemi illustreeriv joonis on toodud joonisel 3.5.



Joonis 3.5. Pöörlevate ketastega vetikareaktor. Tähised: temperatuuri andur (T), krüostaat (cryostat), pH andur (pH), pump, mis lisab süsteemile süsihappegaasi, et muuta pH väärtust (CO2(g)), mootorid ketaste pöörlema panemiseks (M) ning reovee tsirkulatsioonipump [16].

W. Blanken jt. (2014) kasutasid kettamaterjalidena metallvõrgusilmust ning lihvitud polükarbonaati, mille peale olid tehtud poorid, kuhu vetikas saaks kinnituda. Poorid olid sama suured. Teadustöö tulemusena leiti, et metallist võrgusilmusega oli kasvukiirus suurem, kui polükarbonaadi puhul. Biomassi kasvukiiruseks saadi kesmiselt 20,1 $\pm$ 0,7 g · m^{-2}.

3.4. Katsetatava reaktori valik

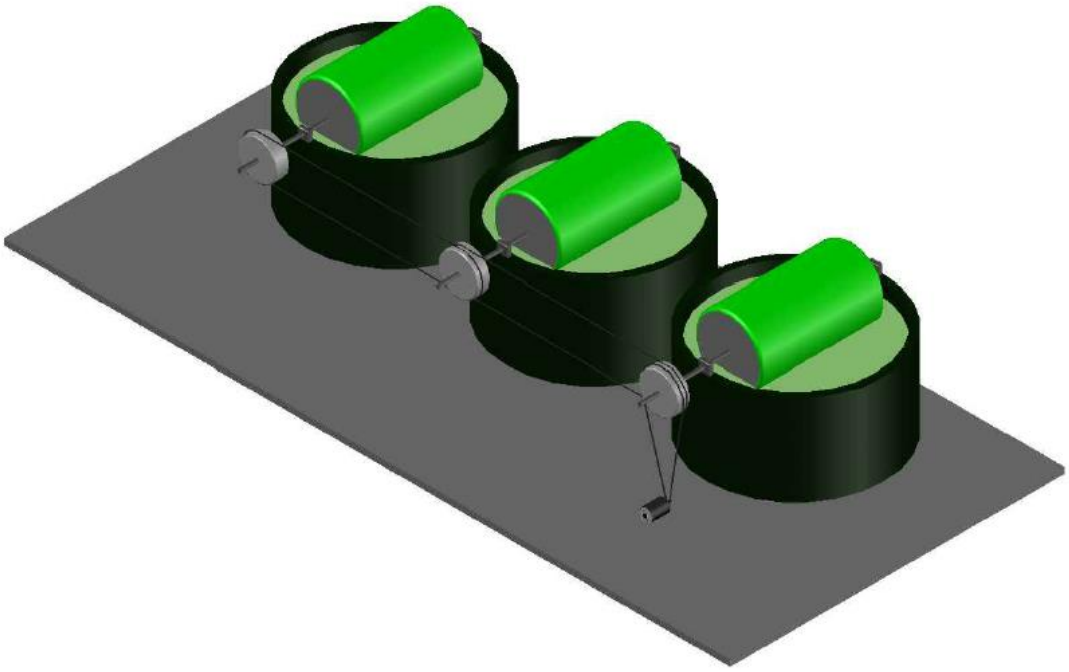
Antud töö käigus ehitatavaks bioreaktoriks valiti biokile reaktor, kuna varasemalt tehtud uurimustööd [17, 6] on näidanud, et neid reaktori tüüpe saab integreerida reovee puhastusega. Lisaks on sellist tüüpi reaktorite puhul kergem biomassi eemaldada, erinevalt reaktoritest, kus biomass asub vedelsöötmes. Samuti on biokile-reaktorid energiatõhusamad – reoveepuhastusjaamades, kus kasutati PBK-reaktoreid ning aktiivmuda, oli tarbitav energiahulk vastavalt 0,12 kWh · m^{-3} ning 0,576 kWh · m^{-3} [19].

Ketastega PBK reaktori ja silindritega PBK reaktori peamine erinevus seisneb selles, et ketastega reaktori puhul asetseb biomass ketaste külgedel, silindrite puhul asetseb biomass selle peal. Kuna on vajalik ära kasutada maksimaalne kogus looduslikku valgust, siis oleks parem, kui biomassi kile asetseks maaga horisontaalselt. Lisaks ilmnes kirjanduse põhjal asjaolu, et pöörlevate silindritega reaktori puhul saadi suurem biomassi juurdekasv (31 g · m^{-2} · $päev^{-1}$), kui ketaste puhul (20,1 $\pm$ 0,7 g · m^{-2} · $päev^{-1}$).

4. REAKTORI EHITUS

4.1. Reaktori konstruktsiooniline lahendus

Reaktoriks valiti eelnevate kirjandusallikate põhjal pöörlevate kontaktoritega reaktor, täpsemini pöörlevate silindritega reaktor. Reaktori kavandamisel oli peamiseks eesmärgiks saada võimalikult ühtlaseid katsetulemusi, seetõttu ehitati reaktor nii, et üks elektriline ajam käitaks korraga kolme pöörlevat silindrit. Reaktori konstruktsioonilist lahendust illustreeriv joonis on toodud joonisel 4.1.



Joonis 4.1. Pöörlevate silindritega reaktor

Joonisel 4.1 on näha, et pöörlevaid silindreid käitab üks mootor. Mootor on ühendatud silindrite võlli peal olevate ülekandeketastega. Jõu ülekandmiseks kasutati venivaid rihmasid. Silindrid konstrueeriti plastiktorudest, mis andsid lõpptulemusena katsekausis toitelahusega kontakteeruvaks silindri diameetriks 15 cm. Ülekandeketaste diameeter on 11 cm. Ülekanne esimeselt teisele silindrile ja teiselt silindrilt kolmandale silindrile on võrdne, mistõttu on ka silindrite pöörlemiskiirused võrdsed. Võllina kasutati keermelatti ning laagritena kasutati

ABEC 7 rulluisu laagreid. Joonisel 4.2 on toodud biokile reaktori konstruktsioonilise lahenduse foto.

Joonis 4.2. Biokile reaktori konstruktsiooniline lahendus

Joonisel on näha silindrite omavahelise ühenduse lahendus kasutades ülekanderihmasid. Pleksiklaasi külge kinnitati katsekausid koos silindritega poltide abil. Lekete vältimiseks pandi poltide ja mutrite vahele kummist seibid. Mootor kinnitati aluse külge samuti keermelatiga, mis kinnitati mutrite ja seibidega. Plastiktorud seoti hermeetilise silikooniga, et vesi ei pääseks silindrite sisse. Aluste põhja lisati äravooluaugud, et katsetuste lõppedes oleks mugav järelejäävat vett anumatest eemaldada. Eelnevalt arvutati välja sobiva mootori nimiandmed.

4.2. Reaktori ajami arvutus

Elektrimootori võimsus avaldub [20] :

$$P = P_v + P_{pL}, \tag{4.1}$$

kus P_v – vee hõõrdejõu ületamiseks vajaminev võimsus, W;

P_{pL} – mootori mehaaniline võimsus tulenevalt pöördemomendi ja laagrite hõõrdemomendi summast, W.

Vee hõõrdejõu ületamiseks vajaminev võimsus avaldub [20]:

$$P_v = F_{ve} \cdot v \cdot \eta_{ü}^{-1}, \tag{4.2}$$

kus F_{ve} on vee hõõrdejõud, N;

v – liikumiskiirus, m/s;

$\eta_{ü}$ – ülekande kasutegur.

Vee hõõrdejõud saadakse [21]:

$$F_{ve} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_v \cdot A, \tag{4.3}$$

kus ρ on vee tihedus, 997,8 kg/m^3 (22°C);

v – keha kiirus vedeliku suhtes, m/s;

C_v – hõõrdekoefitsient, 0,7 [21];

A – veega kokkupuutuv pindala, m^2.

Veega kokkupuutuv pindala leitakse järgmiselt :

$$A = \frac{2}{5} \cdot b \cdot l, \tag{4.4}$$

kus b on silindri ümbermõõt, m;

l – silindri pikkus, 0,2 m.

Leitakse silindri ümbermõõt :

$$b = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot 0{,}075 = 0{,}47 \text{ m}. \tag{4.5}$$

kus r on silindri raadius, 0,075 m.

Saadi, et silindri ümbermõõt on 0,47 m.Valemi 4.4 abil leitakse trumli veega kokkupuutuv pindala :

$$S = \frac{2}{5} \cdot 0{,}47 \cdot 0{,}2 = 0{,}0376 \text{ m}^2.$$

Leiti, et silindri veega kokkupuutuv pindala on 0,0376 m^2. Leitakse vee hõõrdejõud valemi 4.3 abil:

$$F_{ve} = \frac{1}{2} \cdot 997{,}8 \cdot 0{,}12^2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}0376 = 0{,}189 \text{ N}.$$

Saadi, et vee poolt tekitatav hõõrdejõud trumlile on 0,189 N. Leitakse vee hõõrdejõu ületamiseks vajaminev võimsus valemi 4.2 abil :

$$P_v = \frac{0{,}189 \cdot 0{,}12}{0{,}9} = 0{,}0252 \text{ W}.$$

Selleks, et ületada vee poolt tekitatav hõõrdejõud on vaja võimsust 0,0252 W. Töömasina pöördemomendist ja laagrite poolt tekitatavast hõõrdemomendist tulenev mehaaniline võimsus leitakse [22] :

$$P_{pL} = \frac{M_{pL} \cdot n}{9{,}5488}, \tag{4.6}$$

kus M_{pL} on pöördemomendi ja laagrite hõõrdemomendi summa, N · m;
n – töömasina pöörlemiskiirus, pööret · min^{-1}.

Pöördemomendi ja laagrite hõõrdemomendi summa leitakse :

$$M_{pL} = M_p + M_L, \tag{4.7}$$

kus M_p on pöördemoment, N·m;
M_L – hõõrdemoment, N·m.

Pöördemoment leitakse järgmiselt [23]:

$$M_p = I \cdot a, \tag{4.8}$$

kus a on nurkkiirendus, rad/s^2;

I – inertsimoment, kg · m^2

Seest õõnsa silindrilise keha inertsimoment [23] :

$$I = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (D_1^{\ 2} + D_2^{\ 2}) \,, \tag{4.9}$$

kus m on keha mass, kg;

D_1 – silindri välimine diameeter, m;

D_2 – silindri sisemine diameeter, m;

$$I = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot (0{,}15^2 + 0{,}14^2) = 0{,}02105 \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

Leiti, et seest õõnsa silindrilise keha inertsimoment on 0,02105 kg · m2. Leitakse nurkkiirendus :

$$a = \frac{\omega}{t} \,, \tag{4.10}$$

kus ω on nurkkiirus, rad/s (v/r = 0,12/0,075=1,6);

t on kulunud aeg, s.

$$a = \frac{1{,}6}{2} = 0{,}8 \text{ rad/s}^2.$$

Saadi, et nurkkiirendus sellise silindrilise keha puhul on 0,8 rad · s^{-2}. Leitakse pöördemoment valemi 4.8 abil:

$$M_p = 0{,}02105 \cdot 0{,}8 = 0{,}017 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

Saadi, et pöördemoment on 0,017 N · m. Selleks, et leida laagrite poolt tekitatav hõõrdemoment, on vaja leida raskusjõud :

$$F_g = m \cdot g \,, \tag{4.11}$$

kus g on raskuskiirendus, 9,81 m s^{-2}.

Keha mass on 1 kg, kuna laagreid on 2, mõjub ühele laagrile koormus massiga 0,5 kg.

$$F_g = 0{,}5 \cdot 9{,}81 = 4{,}905 \text{ N}.$$

Lisaks mõjub ka silindrile vee poolt tekitatav üleslükkejõud :

$$F_ü = \rho \cdot V \cdot g \tag{4.12}$$

kus V on keha ruumala.

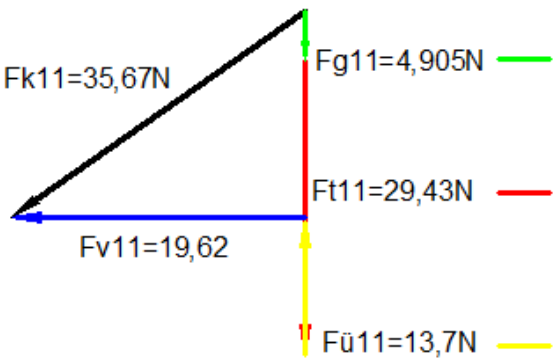
Silindrilise keha ruumala, mis jääb vee alla, leitakse järgmiselt :

$$V = \frac{2}{5} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h = \frac{2}{5} \cdot \pi \cdot 0{,}075^2 \cdot 0{,}2 = 0{,}0014 \text{ m}^3. \tag{4.13}$$

Leiti, et keha ruumala, mis on vee all on 0,0014 m^3. Valemis korrutati ruumala 2/5-ga, kuna 40% peaks jääma silindrist vee alla. Leitakse üleslükkejõud valemi 4.12 abil :

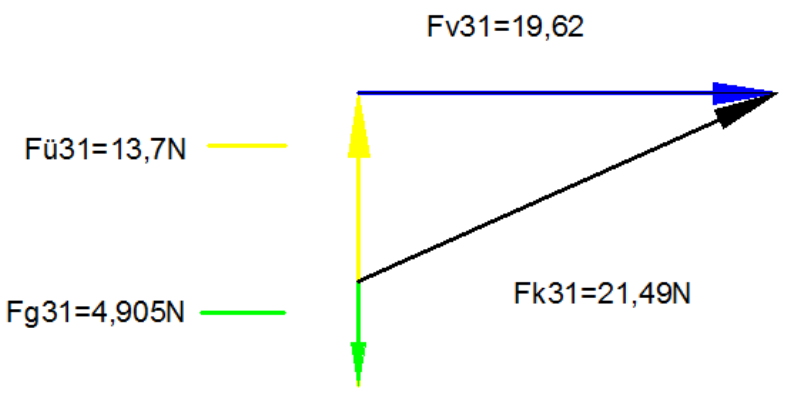
$$F_ü = 997{,}8 \cdot 0{,}0014 \cdot 9{,}81 = 13{,}7 \text{ N}.$$

Leiti, et vee poolt tekitatav üleslükkejõud on 13,7 N. Lisaks mõjuvad laagitele ka kinnitusrihmadest tingitud tõmbejõud. Üks on suunaga alla poole ja teine suunaga vasakule. Need jõud on leitud mõõtmiste teel. Kogu jõud esimesele laagrile leitakse vektoriaalse liitmise teel :



Joonis 4.3. Esimesele laagrile mõjuv jõud

Joonisel 4.3 on F_{g11} raskusjõud, F_{t11} mootori võlli ja silindri võlli vahelise rihma poolt tekitatud jõud, $F_{ü11}$ on vedeliku üleslükkejõud ja F_{v11} on järgmise silindri võlli rihma poolt tekitatud jõud. Leiti, et kogu laagrile mõjuv jõud on 35,67 N. Sama silindri tagumisel laagril veorihmadest tulenenud jõudusid ei arvestata. Arvestatakse ainult raskusjõudu ja üleslükkejõudu. Teisele laagrile mõjuv jõud on seega F_{k2} = 13,7 - 4,905 = 8,795 N. Teise silindri puhul arvestatakse samuti ainult raskusjõudu ja üleslükkejõudu. Viimase silindri esimesele laagrile mõjub samuti veorihmast tingitud jõud, mis on 19,62 N.



Joonis 4.4. Viimase silindri esimesele laagrile mõjuv raskusjõud

Joonisel 4.4 leiti, et kogu laagrile mõjuv jõud on 21,49 N. Seega saame leida kõikidele laagritele mõjuvate jõudude summa :

$$F_L = F_{k11} + F_{k12} + F_{k21} + F_{k22} + F_{k31} + F_{k32} + F_m, \tag{4.14}$$

kus F_{k11} on esimese silindri esimesele laagrile mõjuv jõud, N;

F_{k12} – esimese silindri teisele laagrile mõjuv jõud, N;

F_{k21} – teise silindri esimesele laagrile mõjuv jõud, N;

F_{k22} – teise silindri teisele laagrile mõjuv jõud, N;

F_{k31} – kolmanda silindri esimesele laagrile mõjuv jõud, N;

F_{k32} – kolmanda silindri teisele laagrile mõjuv jõud, N;

F_m – mootori võlli laagritele mõjuv jõud, N.

Mootori võlli laagritele mõjuv jõud võetakse võrdseks esimesele silindrile mõjuva ülekanderihma poolt tekitatud jõuga, $F_m = F_{t11}$ = 29,43N. Leitakse kogu laagritele mõjuv jõud:

$$F_L = 35{,}67 + 8{,}795 + 8{,}795 + 8{,}795 + 21{,}49 + 8{,}795 + 29{,}43 = 121{,}77 \text{ N}.$$

Leiti, et kogu raskusjõud, mis mõjub laagritele on 121,77 N. Saame arvutada laagrite poolt tekitatava hõõrdemomendi [24]:

$$M_L = \frac{\mu \cdot F_L \cdot d}{2}, \tag{4.15}$$

kus μ on hõõrdekoefitsient, 0,0015 [24];

d – võlli diameeter, 0,01m;

$$M_L = \frac{0{,}0015 \cdot 120{,}77 \cdot 0{,}01}{2} = 0{,}0009 \text{ N}\cdot\text{m}.$$

Saadi, et kogu laagrite poolt tekitatav hõõrdemoment on 0,0009 N · m. Valemi 4.7 põhjal saame :

$$M_{pL} = 3 \cdot 0{,}017 + 0{,}0009 = 0{,}0519 \text{ N}\cdot\text{m}. \tag{4.16}$$

Leiti, et pöördemomendi ja laagrite poolt tekitatava hõõrdemomendi summa on 0,0519 N · m. Valemis 4.16 korrutati pöördemoment kolmega, kuna seadmel on 3 samasugust silindrit. Laagrite poolt tekitatav hõõrdemoment oli leitud juba kolme silindri kohta. Valemi 4.6 põhjal leitakse pöördemomendist ja laagrite poolt tekitatavast hõõrdemomendist tulenev vajalik mehaaniline elektrimootori võimsus :

$$P_{pv} = \frac{0{,}0519 \cdot 15{,}3}{9{,}5488} = 0{,}083 \text{ W}.$$

Saadi, et mootori mehaaniline võimsus on 0,083 W. Kogu võimsus leitakse valemi 4.1 abil :

$$P = 0{,}0252 \cdot 3 + 0{,}083 = 0{,}1586 \text{ W}. \tag{4.17}$$

Kogu ajami mehaaniline võimsus on 0,1586 W. Vee hõõrdejõu ületamiseks vajaminev võimsus korrutati kolmega, kuna see võimsus leiti ühe silindri kohta. Leiti, et kogu vajalik võimsus kiiruse juures 0,12 m · s^{-1} oleks 0,143 W. Leiti, et silindri pöörlemissagedus on 15,3 pööret min^{-1}, kuna 1 rad · s^{-1} = 9,55 pööret min^{-1}. Silindri vedava võlli diameeter on 0,11 m. Mootori pöörlemiskiirus arvutatakse välja järgmisest seosest :

$$d_1 \cdot n_1 = d_2 \cdot n_2, \tag{4.18}$$

kus d_1 on vedava võlli diameeter, 0,11 m;

n_1 – silindri pöörlemissagedus;

d_2 – mootori võlli diameeter, 0,01 m;

n_2 – mootori pöörlemissagedus.

$$n_2 = \frac{d_1 \cdot n_1}{d_2} = \frac{0{,}11 \cdot 15{,}3}{0{,}01} = 168{,}3 \text{ pööret min}^{-1}.$$

Leiti, et mootori pöörlemiskiirus peab olema 168,3 pööret min^{-1}. Valemi 4.6 põhjal leitakse kogu töömasina pöördemoment :

$$M_k = \frac{P \cdot 9{,}5488}{n_2} = \frac{0{,}1586 \cdot 9{,}5488}{168{,}3} = 0{,}009 \text{ N} \cdot \text{m}. \tag{4.19}$$

Seega peab olema sobiva mootori pöördemoment suurem, kui 0,009 N · m ja pöörlemissagedus peaks olema 168,3 pööret min^{-1}. Kuna mootor valitakse kestevtalitluseks, peab kehtima järgnev seadus [20]:

$$M_m \geq (1{,}2..1{,}5) \cdot M_k \tag{4.20}$$

kus M_k on mootori käivitusmoment, N · m. Sobiva mootori nimiandmed on toodud tabelis 4.1.

Tabel 4.1. Valitud mootori nimiandmed [25]

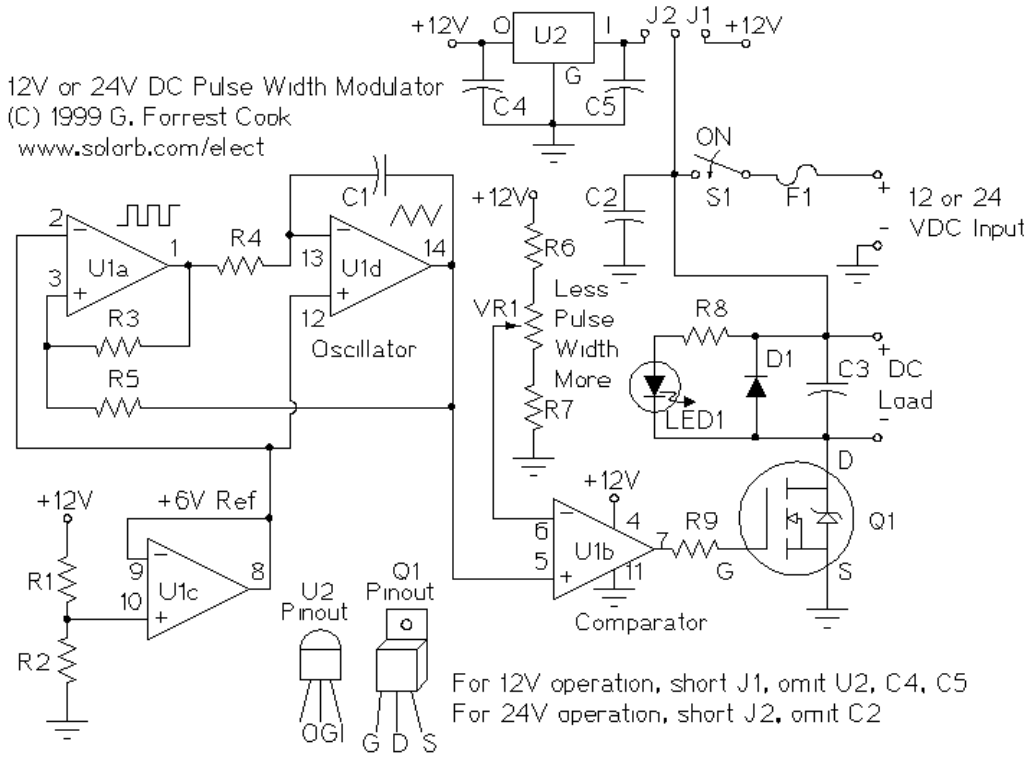
Spetsifikatsioon	**Väärtus**
Nimipinge	24VDC
Nimivool	120 mA
Pöörlemiskiirus	220..315 min^{-1}
Pöördemoment	0,04 N·m
Mõõtmed	30 x 57,5mm
Ülekandearv	10:1
Temperatuurivahemik	-20..+60 °C

Mootor sobib kestevtalitluseks, sest $0{,}04 \geq 0{,}0135$.

4.3. Mootori kiiruse reguleerimine

Mootori kiiruse reguleerimise vajadus tulenes sellest, et soovitud mootori pöörlemiskiirus on 168,3 pööret min^{-1}, kuid tegelik mootori pöörlemiskiirus on 220..315 pööret min^{-1}. Seetõttu oli vaja seda vähendada. Lisaks võib tulevikus vaja minna võimalikkust teha katseid ka teiste pöörlemiskiiruste juures.

Pöörlemiskiiruse muutmise jaoks kasutati pulsilaiusmodulatsiooni. Pulsilaiusmodulatsioon töötab põhimõttel, et muudetakse mootorisse saadetavate impulsside laiust. Pulsilaiusmodulatiooni moodul tekitab väljundina nelinurksignaali, millel on võimalik muuta kõrgseisu aega. Sellega muudetakse mootorisse jõudvat efektiivväärtust, ehk energiat, mis muundatakse reaalselt tööks. Selliselt on võimalik muuta mootori kiirust vahemikus 0..100 %. Pulsilaiusmodulatsiooni skeemina kasutati joonisel 4.5 toodud skeemi.



Joonis 4.5. Pulsilaiusmodulatsiooni skeem [26]

Joonisel 4.5 on toodud 12V ja 24V mootori kiiruse reguleerimise skeem. Süsteem vajab töötamiseks ostsillaatorit. U1a ja U1d tekitavad kolmnurksignaali, mille sagedus on umbes 400 Hz. U1b töötab kui komparaator, mis võrdleb ostsillaatori poolt tekitavat signaali potentsiomeetrist (VR1) tuleva signaaliga. Mida madalam on potentsiomeetri poolt tekitatav

pinge, seda vähem aega on ka komparaatori väljund kõrgseisus. Komparaatori väljund lülitab sisse-välja väljatransistori (Q1). Väljatransistori sisse-välja lülitamisega lülitatakse mootori maandust (0V DC) sisse-välja, mis muudabki mootori poolt kasutatavat efektiivväärtust [27]. PLM mooduli skeem prinditi Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudis, kus ta pandi plaadi peale. *Eagle* programmi skeem on toodud lisas B.1. Kasutatud komponentide nimistu vastavalt *Eagle* programmis olevatele tähistele (lisa B.1) on toodud tabelis 4.2.

Tabel 4.2. PLM moodulis kasutatud komponentide nimistu

Tähis	Komponent
IC1A, IC1B, IC1C, IC1B	Operatsioonivõimendi LM324N
R1..R4	Takisti, 100 kΩ
R5	Takisti, 47 kΩ
R6, R7	Takisti, 3,3 kΩ
R8	Takisti, 2,7 kΩ
R9	Takisti, 470 Ω
C1, C4	Kondensaator, 0,01 µF
C2	Kondensaator, 0,33 µF
C3	Kondensaator, 0,1 µF
VR1	Potentsiomeeter, 10 kΩ
Q1	Väljatransistor IRFZ34N
D1	Diood 1N4004
F1	Kiiretoimeline sular, 3A
S1	Lihtlüliti
IC3	Pingestabilisaator KA78L12AZ

Lisas B.2 on toodud PLM mooduli trükkplaat. Mootori ja PLM mooduli toiteplokina kasutati 230VAC/24VDC toiteplokki. Toiteploki maksimaalne väljundvoolutugevus on 1,46 A. Toiteplokki illustreeriv foto on toodud joonisel 4.6.

Joonis 4.6. Mootori toiteplokk.

Mootori toiteplokil on 230VAC sisendid (N ja L) ning maandus (PE). Väljunditena on 24VDC (+ ja -). Toiteplokile paigaldati piisavalt pikad juhtmed, et need oleksid ohutus kauguses veest. Lahtised kontaktid isoleeriti ära teibiga. Joonisel 4.7 on toodud konstrueeritud pulsilaiusmodulatsiooni elektrooniline plaat.

Joonis 4.7. Pulsilaiusmodulatsiooni moodul mootori juhtimiseks.

5. REAKTORI KATSED

5.1. Katsete ülesehitus

Reaktori katsed tehti eesmärgiga võrrelda biokile-reaktori efektiivsust mikrovetika vedelkultuuriga. Mikrovetikat *Scenedesmus obliquus* eelkasvatati 4 päeva Boldi toitelahuses [27] 22°C juures fluorestsentsvalgustite all valgustihedusega 7,5 klux, et saavutada rakkude eksponentsiaalne kasv. Katsed viidi läbi kahe seeriana, kasutades pinnamaterjalina puuvillast riiet või puuvillast nööri. Materjalid valiti kirjandusallikate põhjal [16, 6]. Kolm silindrit toimisid katse replikaatidena. Kontrolli ja võrdlusena kasutati vedelsöötmes kasvavat mikrovetikat, mille koostis on toodud tabelis 5.1. Reovee valmistamiseks kasutati kraanivett.

Tabel 5.1. Sünteetilise reovee valmistamiseks kasutatud toitainete kogused

Toitaine	**Kogus, g · L^{-1}**
$NaNO_3$	0,03
Uurea	0,035
KH_2PO_4	0,018
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0,013
$CaCl \cdot 2H_2O$	0,043
$C_{10}H_{16}N_2O_8$	0,015
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	0,005

Bioreaktori anumad täideti sünteetilise reoveega nii, et ~40 % reaktori silindri pinnast paikneks reovees. Katse alguses fikseeriti vastavalt puuvillase riide või nööri kaal kasutades analüütilist kaalu (ME Analytical Balances, Mettler Toledo). Kõigi katses kasutatud riidetükkide pindala oli 0,094 m^2 ning puuvillase nööri pikkus oli 10 m, mille pindala iga silindri puhul oli 0,04 m^2. Reaktori pinnale valati 250 mL mikrovetikalahust, puuvillase riide katse puhul oli algseks biomassiks 0,1 g · L^{-1}, puuvillase nööri katse puhul oli algne biomass 0,085 g · L^{-1}. Reaktorite pöörlemiskiiruseks oli 0,12 m· s^{-1}. Kontrollina kasutati klaasanumat, millesse lisati reaktorianumatega võrdne kogus sünteetilist reovett ja eelkasvatatud mikrovetikat. Anum ning reaktorid asetati fluorestsentsvalgustite alla valgustihedusega 7,5 klux. Ühe katse kestus oli 6 ööpäeva. Katse lõppedes vastavalt puuvillane riie või puuvillane nöör kuivatati kuivatusahjus 100 °C juures 24 h ning seejärel kaaluti vetikate biomassi arvutamiseks. Reaktorianumates ning klaasanumas olev sünteetiline reovesi

filtreeriti läbi eelnevalt kaalutud filtrite (2 µm, Whattman), et arvutada vees olev biomassi kontsentratsioon. Reaktori pinnal puuvillase riide peal kasvanud biomass arvutati ümber biomassiks pindalaühiku (m^2) kohta kasutades valemit :

$$m_{pt} = \frac{m_p}{S_p} \quad , \tag{5.1}$$

kus m_p on biomasside keskmine puuvillase riidetüki katses, g;

S_p on puuvillase riidetüki pindala, m^2.

Puuvillase nööri biomassi arvutamiseks pindalaühiku kohta kasutati valemit :

$$m_{n1} = \frac{m_n}{S_n} \quad , \tag{5.2}$$

kus m_n on biomasside keskmine puuvillase nööri katses, g;

S_n on puuvillase nööri pindala, m2.

TULEMUSED JA ARUTELU

Katsest puuvillase riidega saadi katse lõppedes keskmiseks biomassiks 2,18 g, mis pindalaühiku kohta oli 10,84 g · m^{-2}, kusjuures juurdekasv päeva kohta oli keskmiselt 1,8 g · m^{-2} · $päev^{-1}$. Selle katse puhul reaktori anumatesse jäänud biomass oli keskmiselt 1,0440 g ja riidetükile jäänud biomass oli keskmiselt 1,0887 g. Vedelkultuuri puhul oli lisatud biomass 0,1 g · L^{-1} ehk kokku 0,025 g. Ehkki biomassi juurdekasv puuvillasel riidel oli suurem, kui vedelkultuuris, jäi reaktori anumatesse peaaegu sama suur kogus biomassi. Selle põhjuseks võib olla ruumipuudus, mis tuleneb puuvillase riidetüki küllastumisest rakkudega. Antud katse jäädvustus on esitatud joonisel 6.1.

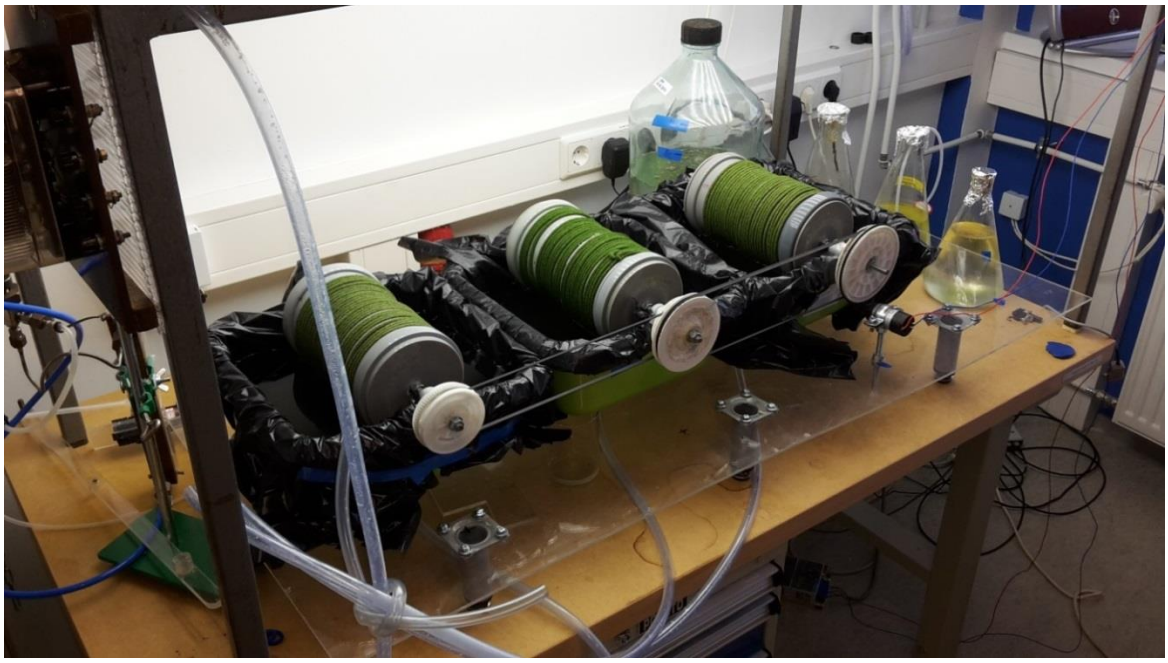
Joonis 6.1. Puuvillase riide katse viimasel päeval

Puuvillase nööri katsest saadi keskmiseks biomassiks 3,3494 g, mis pindalaühiku kohta pinnakatte peal tegi biomassiks 76,1 g · m^{-2}, kusjuures jurdekasv päeva kohta oli keskmiselt 12,683 g · m^{-2} · $päev^{-1}$. Selle katse puhul reaktori anumatesse jäänud biomass oli keskmiselt 0,2840 g ja puuvillase nööri peale jäänud biomass oli keskmiselt 3,0654 g. Biomassi erinevus katse lõppedes võrreldes puuvillase riidega oli umbkaudu 7–kordne. Puuvillase nööri suurem biomassi kontsentratsioon võib tuleneda puuvillase nööri struktuurist, mille puhul saavad

mikrovetikad kinnituda nii nööri pinnale kui ka nöörikiudude vahele. Vetikate kinnitumine nöörile on näidatud joonisel 6.2.

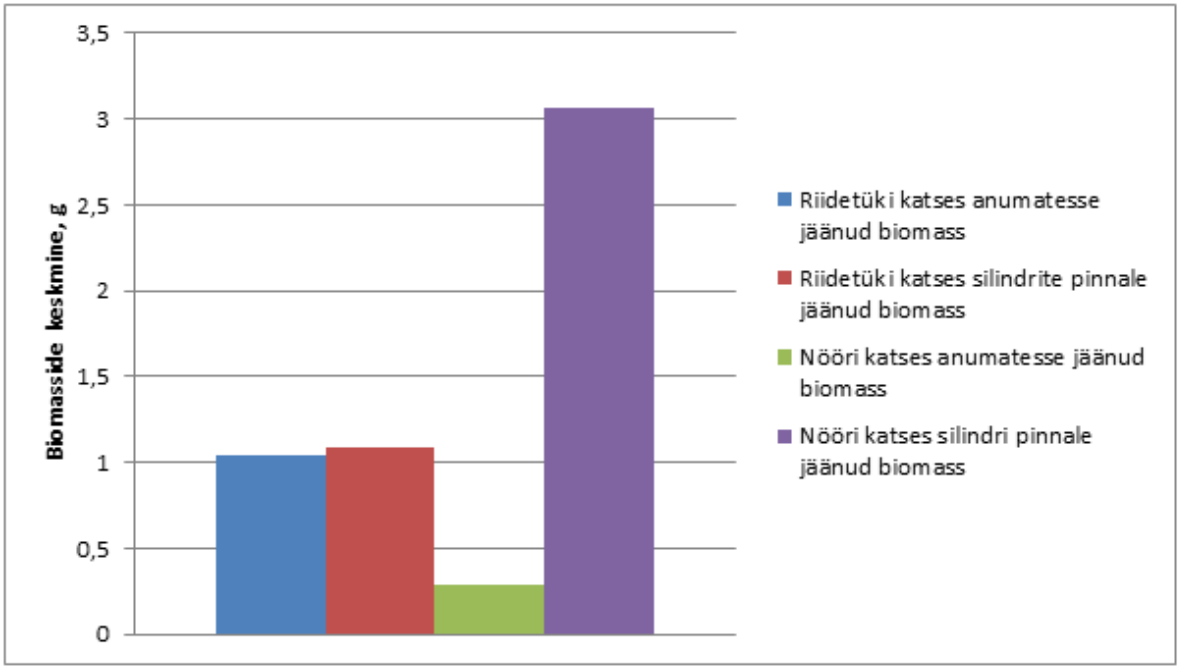
Joonis 6.2. Biomassi juurdekasv kuue päeva jooksul puuvillase nööri katses. 1 – katse esimene päev, 2 – katse kolmas päev, 3 – katse kuues päev

Puuvillase nööri katse reaktori viimase päeva jäädvustus on esitatud joonisel 6.3.



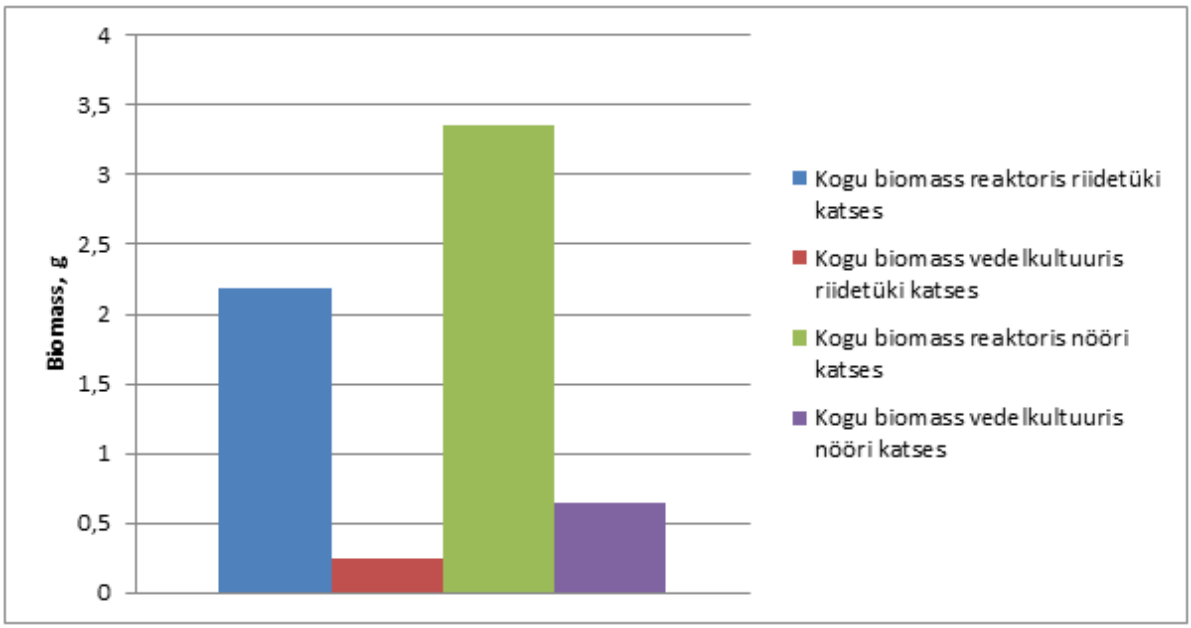
Joonis 6.3. Biokile-reaktor puuvillase nööri katse viimasel päeval

Puuvillase riidetüki ja puuvillase nööri võrdlus on toodud joonisel 6.4.



Joonis 6.4. Katsete tulemusena saadud biomasside keskmised

Samuti on biokile-reaktori katsetes saadud kogu biomass erinev vedelkultuuris saadud katsetulemustega. Saadud andmed on illustreeritud joonisel 6.5.



Joonis 6.5. Reaktori katsete tulemused võrrelduna vedelkultuuri katsetes saadud tulemustega.

Joonisel 6.5 on näha, et biokile-reaktori tootlikkus on kõrgem vedelkultuuri tootlikkusest. See kinnitab kirjandusest leitud väidet, et biokile-reaktori puhul võib mikrovetikate biomass olla

kõrgem kui vedelkultuuri, sh suletud fotobioreaktoris kasvatatud mikrovetikate puhul. Kahte pinnamaterjali võrreldes saab väita, et nöör on selleks eesmärgiks sobivam, kuna pakub sama pindalaühiku kohta rohkem kinnitumisruumi. Samuti on nööri võimalik vastava mehhanismiga suhteliselt kiiresti ja lihtsalt puhastada ning taaskasutada, mistõttu sobib selline lahendus tõhusaks biomassi kokkukogumiseks.

Mikrovetikate kinnitumine biokile-reaktori maatriksile võib sõltuda mitmest tegurist – mikrovetika liigist, kontsentratsioonist ning kasvujärgust, reovee koostisest ning bakteriaalsest koosseisust, lahustunud süsihappegaasi kontsentratsioonist kasvukeskkonnas, valgusest, temperatuurist, reaktori pinnamaterjalist (maatriksist) ning reaktori pöörlemiskiirusest. Sooritatud katsetes hoiti temperatuuri konstantsena, valgust, reovee näitajaid (mis oli põhjuseks sünteetilise reovee kasutamiseks) ning reaktori pöörlemiskiirust, kuna peamiseks eesmärgiks oli võrrelda kinnitumist kahele erinevale maatriksi pinnale ning võrrelda tulemusi vedelsöötmes kasvava vetikamassiga. Tulevikus on kavas katsetada lisamaterjale ning uurida seost reaktori pöörlemiskiiruse ja mikrovetikate kinnitumise vahel. Seda võimaldab ehitatud pulsilaiusmodulatsiooni moodul, mis aitab reguleerida mootori ja silindrite pöörlemiskiirust 0 – 100%, mis tähendab, et silindrite pöörlemiskiiruseks saab sättida 0 – 28,6 pööret min^{-1}.

Antud katsetes ei mõõdetud lämmastiku ja fosfori muutumist vees. Siiski saab väita, et kuna biokile-reaktori puhul oli biomassi juurdekasv suurem võrreldes vedelsöötmes kasvavate vetikatega, oli ka lämmastiku ja fosfori sidumine nende katsete puhul suurem. Keskmiselt vastab mikrovetikate süsiniku-, lämmastiku- ja fosforivajadus Redfield´i suhtele, mis on vastavalt 106:16:1, mistõttu saab väita, et kaudselt oli biokile-reaktori puhul ka lämmastiku ja fosfori sidumine suurem, kui vedelsöötme puhul. Tulevikus tuleks määrata katseliselt nende toitainete vähenemise hulka mikrovetikate kasvamisel.

Võimalik energiasääst reaalses reoveepuhastussüsteemis tuleks välja selgitada katseliselt, fikseerides bakterite aereerimiseks kuluvat energiat. Fotosünteesi käigus vabaneb 6 hapnikumolekuli vastavalt reaktsioonile :

$$6\ CO_2 + 6\ H_2O \text{ ------> } C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

Orgaanilise lämmastiku oksüdeerimiseks kulub aga 4 hapnikumolekuli :

(reaktsiooni viib läbi Nitrosomonas sp) $2\ NH_4^+ + 3\ O_2$ -----> $2\ NO_2^- + 4\ H_2O$ + uued rakud

(reaktsiooni viib läbi Nitrobacter sp) $2\ NO_2^- + O_2$ ----> $2\ NO_3^-$ + uued rakud,

kusjuures 1 g orgaanilise lämmastiku (ammooniumi NH_4^+) oksüdeerimiseks kulub 4,33 g O_2. Energiasäästu väljaarvutamiseks tuleb leida nii reaktori energiakulu kui ka aereerimise vähenemisest tingitud elektrienergia kokkuhoid. Katseid tuleks läbi viia nii laboriskaalal kui ka *in situ* reoveepuhastusjaamas. Mõõdetud mootori voolutarbimine oli kiirusel 0,12 m · s-1 umbes 4 korda väiksem tema nimivoolust. Kuna ka mootori arvutuslik pöördemoment oli umbes 4 korda väiksem tema nimipöördemomendist, saab väita, et arvutused olid õiged.

Pöörlevate silindritega biokile-reaktor on lihtsalt reoveepuhastusjaama bioloogilise käitluse basseinidega kohandatav ning konstruktsiooniliselt suhteliselt lihtne, mistõttu biokile-reaktori ehituskulud võiksid jääda suhteliselt madalaks. Ka vetika-bakterimassi kokkukogumine on lihtne, mis minimaliseerib võimalikke kulusid seoses biomassi koristusega. Puuvillast nööri on võimalik taaskasutada, kuna see ei sisalda ei sünteetilisi ega ohtlikke aineid, on võimalik nööri ka kompostida või biogaasistada. Tulevikus oleks siiski tarvilik katsetada efektiivsemate ja odavamate kattematerjalidega.

KOKKUVÕTE

Antud töö käigus konstrueeriti biokile-vetikareaktor eesmärgiga uurida mikrovetikate kinnitumist kahele erinevale pinnamaterjalile. Töö käigus leiti, et kõige paremini sobiv vetikareaktor antud probleemi täitmiseks oleks pöörlevate silindritega vetikareaktor. Sellest lähtuvalt ehitati ka vastav katsestend, mille puhul on võimalik silindrite pöörlemiskiirust muuta ning ka katsetada erinevaid materjale, mille küljes kasvab mikrovetikate biomass.
Vetikareaktorit iseloomustavateks parameetriteks saadi :

- silindrite diameeter on 15 cm;
- silindrite kiirust saab muuta vahemikus 0 – 28,6 pööret min^{-1};
- reaktorit käitava elektrilise alalisvoolumootori pöördemoment on 0,04 N · m;
- reaktorit käitava elektrilise alalismootori nimivoolutugevus on 120 mA;
- reaktorit käitava elektrilise alalisvoolumootori nimipinge on 24 V.

Töös tehtud kahes katseseerias kasutati silindrite kattematerjalidena puuvillast riiet ja puuvillast nööri. Vastavalt saadi kuue päevase katsetulemusena keskmiseks päevaseks juurdekasvuks 1,8 $g \cdot m^{-2} \cdot päev^{-1}$ ja 12,685 $g \cdot m^{-2} \cdot päev^{-1}$. Sellest lähtuvalt võib väita, et puuvillane nöör täidab oma eesmärki paremini. Lisaks on puuvillast nööri võimalik kergema vaevaga puhastada, mistõttu tuleks antud kattematerjali edaspidigi uurida.
Selleks, et leida mikrovetikate kasutamisest saadav elektrienergia kokkuhoid tuleks teha edasisi uuringuid. Tuleks mõõta reaktori energiakulu ning lämmastiku ja fosfori eemaldamist reoveest. Lisaks oleks vaja mõõta lahustunud hapnikusisaldust reovees ja nende tulemuste põhjal välja arvutada energiahulk, mida saaks reoveekäitlusbasseinides hoida kokku aereerimise pealt.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Christenson, L., Sims, R. 2011. Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels and bioproducts. *Biotechnology Advances* 29, 686 – 702.
2. Khiewwjit, R., Temmink, H., Rijnaarts., H., Keesman, K. J. 2015. Energy and nutrient recovery for municipal wastewater treatment: How to design a feasible plant layout? *Environmental Modelling & Software* 68, 156 – 165.
3. Munoz, R., Guieyesse, B. 2006. Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review. *Water research* 40, 2799 – 2815.
4. Razzak, S. A., Hossain, M. M., Lucky, R. A., Bassi, A. S., Lasa, H. 2013. Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27, 622 – 653.
5. Reoveesette töötlemise strateegia väljatöötamine, sh ohutu taaskasutamise tagamine järelvalve tõhustamise, keemiliste- ja bioloogiliste indikaatornäitajate rakendamise ning kvaliteedi süsteemide juurutamise abil. II ETAPP. 2010. Projekt. Keskkonnaministeerium, Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ. 208 lk.
6. Chritenson, L. 2011. Algal Biofilm Production and Harvesting System for Wastewater Treatment with Biofuels By-Products. (Magistritöö). Utah State University. USA.
7. Vabariigi Valitsus. Reovee puhastamise ning heit- ja sademevee suublasse juhtimise kohta esitatavad nõuded, heit- ja sademevee reostusnäitajate piirmäärad ning nende nõuete täitmise kontrollimise meetmed. (vastu võetud 29.11.2012). – *Riigi Teataja* [WWW] https://www.riigiteataja.ee/akt/113062013013 (25.04.2015).
8. Pittman, J. K., Dean, A. P., Osundeko, O. 2011. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. *Bioresource Technology* 102, 17 – 25.
9. Becker, E. W. 2007. Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances* 25, 207 – 210.
10. Chinnasamy, S., Ramakrishan, B., Bhatnagar, A., Das, K. C. 2009. Biomass Production Potential of a Wastewater Alga *Chlorella vulgaris* ARC 1 under Elevated Levels of CO_2 and Temperature. *International Journal of Molecular Sciences* 10, 518 – 532.
11. Li, Y., Zhou, W., Hu, B., Min, M., Chen, P., Ruan, R. R. 2011. Integration of algae as biodiesel production feedstock with municipal wastewater treatment: Strains screening and significance evaluation of environmental factors. *Bioresource Technology* 102, 10861 – 10867.

12. Raeesossadati, M. J., Ahmadzadeh, H., McHenry, M. P., Moheimani, N. R. 2014. CO_2 bioremediation by microalgae in photobiorectors: Impacts of biomass and CO_2 concentrations, light, and temperature. *Algal Research* 6, 78 – 85.
13. Simionato, D., Basso, S., Giacometti, G. M., Morosinotto, T. 2013. Optimization of light use efficiency for biofuel production in algae. *Biophysical Chemistry* 182, 71 – 78.
14. Wei, Q., Hu, Z., Li, G., Xiao, B., Sun, H., Tao, M. 2008. Removing nitrogen and phosphorus from simulated wastewater using algal biofilm technique. *Front. Environ. Sci. Engin. China*, 2(4): 446 – 451.
15. Godos, I., Gonzales, C., Becares, E., Garcia-Encina, P. A., Munoz, R. 2009. Simultaneous nutreints and carbon removal during pretreated swine slurry degradation in a tubular biofilm photobioreactor. *Appl Microbiol Biotechnol*, 82:187 – 194.
16. Blanken, W., Jannsen, M., Cuaresma, M., Libor, Z., Bhaiji, T., Wijffels, R. H. 2014. Biofilm Growth of *Chlorella Sorokiniana* in a Rotating Biological Contactor Based Photobioreactor. *Biotechnol. Bioeng*. 111: 2436 – 2445.
17. Hassard, F., Biddle, J., Cartmell, E., Jefferson, B., Tyrrel, S., Stephenson, T. 2015. Rotating biological contactors for wastewater treatment – A review. *Process Safety and Environmental Protection* 9, 285 – 306.
18. Emajõe Veevärgi heitvee väljalasud. *Emajõe Veevärk.* [WWW] http://www.evv.ee/Heitvee-valjalasud-page-74/ (05.04.2015).
19. Williams, S. E. 2011. Energy usage comparison between activated sludge treatment and rotating biological contactor treatment of municipal wastewater. *Williams & Works, Inc.*
20. Liiske, M. 1998. Tehnoloogiaseadmete elektriajamid. Eesti Põllumajandusülikool. Põllumajandusenergeetika instituut. 98 lk.
21. Blevin, R. 2003. Applied Fluid Dynamics. Krieger Publishing Co. 570 lk.
22. DC Motor Calculations, part I. *National Instruments*. [WWW] http://www.ni.com/white-paper/14921/en/ (23.03.2015).
23. Rotation Kinematics, Moment of Inertia, and Torque. *University of Texas.* [WWW] http://www.google.ee/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0CEEQFjAD&url=http%3A%2F%2Fbolvan.ph.utexas.edu%2F~vadim%2FClasses%2F14s%2Flinang.pdf&ei=rm1LVY_VJ8vcywOt_IHABQ&usg=AFQjCNEVbqvcFfbLTRxxOux1lgDR40gxnA (30.03.2015).
24. Estimating the frictional moment. *SKF Group.* [WWW] http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/ball-bearings/principles/friction/estimating-frictional-moment/index.html (04.04.2015)
25. DC motor, 30 mm, with gearbox 10:1 24 VDC, HL149 10:1 24. *Elfa Distrelec.* [WWW] https://www.elfa.se/elfa3~ee_et/elfa/init.do?item=54-482-46&toc=19864 (10.05.2015)

26. PWM Motor Speed Controller/DC Light Dimmer. *Cook, F*. [WWW] http://www.solorb.com/elect/solarcirc/pwm1/ (04.05.2015).
27. Andersen, R.A. Algal Culturing Techniques. *Elsevier Academic Press*, 2005.

ROTATING BIOFILM REACTOR FOR MICROALGAL GROWTH IN SEWAGE TREATMENT

SUMMARY

Water usage is increasing due to rising human welfare. Because of this, the energy demand of sewage treatment plants are also increasing. Bacteria are used for wastewater treatment in a common sewage treatment plants. Because the bacteria are aerobic, the aeration tanks are used. It is known that about 0,6 kW · h of energy is used for aeration to treat 1 m^3 of sewage. One way to reduce energy consumption is by microalgae.

Microalgae use carbon dioxide and inorganic compounds (phosphorus, nitrogen) for photosynthesis and in this process they emit oxygen. Because bacteria use oxygen and emit carbon dioxide, bacteria-algae system can be used. They both produce biomass, which can be processed into biogas. For this system, microalgae have to be grown in special bioreactors because of algae light requirements.

In this study, it was found, that the best reactor design for such systems are rotating cylinders, because this type of reactor showed the largest biomass growth (31 $g \cdot m^{-2}\ day^{-1}$) [6]. Also such reactor system is simpler to integrate with available aeration tanks. Calculations were done for the construction of a rotating biofilm reactor based on different research papers and a pilot reactor was built.

The reactor was then tested in 2 experiments. In the first one cotton fabric was used and in the second one cotton cord was used as a cover material for the cylinders. Synthetic sewage was used in both experiments, which lasted for 6 days. The results were respectively 1,8 $g \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ ja 12,685 $g \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$. Additionally a liquid culture in a glass container was set up to compare the biomass of liquid culture with the biofilm. The results showed that both biofilm-reactors performed better in regard to biomass: the biomass concentration in the liquid cultures were 0,24 g and 0,648 g compared to 2,18 g in cotton fabrics tests and 3,394 g for the cotton cord. It was thus concluded, that the two materials tested, cotton cord is more promising as a cover material for the biofilm-reactor.

This thesis shows the possibility of using microalgal biofilm reactor in sewage treatment systems, which could be used to save energy. However, further research is needed to select the right materials and conditions for an effective water treatment.

LISAD

LISA A. Heitvee reostusnäitajate piirväärtused ja reovee puhastusastmed

Tabel A.1. Heitvee reostusnäitajate piirväärtused ja reovee puhastusastmed.

Reostusnäitaja	**Reoveekogumisala reostuskoormus**									
	Alla 300 ie		**300 –1999 ie**		**2000 – 9999 ie**		**10 000 – 99 999 ie**		**100 000 ja enam ie**	
	Reostus-näitaja piir-väärtus, mg l-1	**Reovee puhastus-aste, %**	**Reostus-näitaja piir-väärtus, mg l-1**	**Reovee puhastus-aste, %**	**Reostus-näitaja piir-väärtus, mg l-1**	**Reovee puhastus-aste, %**	**Reostus-näitaja piir-väärtus, mg l-1**	**Reovee puhastus-aste, %**	**Reostus-näitaja piir-väärtus, mg l-1**	**Reovee puhastus-aste, %**
Biokeemiline hapnikutarve (BHT_7)	40	Ei kohaldata	25	80	15	80	15	80	15	80
Keemiline hapnikutarve (KHT)	150	Ei kohaldata	125	75	125	75	125	75	125	75
Üldfosfor	Ei kohaldata	Ei kohaldata	2	70	1	80	0,5	90	0,5	90
Üldlämmastik	Ei kohaldata	Ei kohaldata	60	30	45	30	15	80	10	80
Heljuvaine	35	70	35	70	25	80	15	90	15	90

LISA B. Pulsilaiusmodulatsiooni joonised

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Martin Sein,
sünnipäev 23.03.1990

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö pöörlev biokile-reaktor mikrovetikate kasvatamiseks reoveepuhastuses, mille juhendaja on Lara Podkuiko,
   1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
   1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
   1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

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.

Lõputöö autor _____
allkiri

Tartu, 18.05.2015

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

_____ _____
(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)