



**EESTI MAAÜLIKOOL**

**Tehnikainstituut**

**Albert Avarand**

**SIIRDESÜSTEEMI KONSTRUEERIMINE KORSTNAGAASIS LEIDUVA  
SÜSIHAPPEGAASI SIDUMISEKS MIKROVETIKATE BIOMASSI  
FOTOBIOREAKTORIS**

DESIGN OF THE TRANSITION SYSTEM FOR SEQUESTRATION OF CO<sub>2</sub> FROM  
FLUE GAS INTO MICROALGAL BIOMASS IN A PHOTOBIOREACTOR

Magistritöö

Tootmistehnika eriala

Juhendaja: professor Timo Kikas, *PhD*

**Tartu 2017**

## SISUKORD

Tähised ja lühendid .....	5
Sissejuhatus .....	8
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE .....	10
1.1. Biokütuse ja biomassi kirjeldus .....	10
1.2. Biokütuste ajalugu .....	11
1.3. Mikrovetikad biokütusena .....	12
1.4. Bioreaktorid .....	15
1.5. Korstnagaasi sidumine mikrovetikasse .....	16
1.6. Temperatuuri mõju vetikatele .....	17
1.7. Korstnagaasi koostis .....	18
1.8. Mikrovetikad ja korstnagaas .....	19
1.9. Siirdesüsteemi definitsioon .....	20
2. SIIRDESÜSTEEMI KONSTRUEERIMINE .....	21
2.1. Siirdesüsteemi nõuded .....	22
2.2. Siirdesüsteemi komponendid .....	23
2.2.1. Tahkete osakeste eraldamise seade .....	23
2.2.2. Õhupumba vajaliku võimsuse arvutus ja valik .....	26
2.2.3. Andurite spetsifikatsioon .....	29
2.3. Siirdesüsteemi temperatuuri arvutused .....	30
2.4. Siirdesüsteemi massivoo arvutused .....	33
2.5. Siirdesüsteemi tehnilise lahenduse kokkuvõte .....	37
KOKKUVÕTE .....	39
SUMMARY .....	40
KASUTATUD KIRJANDUS .....	41
LISAD .....	44
Lisa A. Tsükloni joonised .....	45
Lisa B. Litsents .....	51

## TÄHISED JA LÜHENDID

$A_c$  - toru ristlõige,  $m^2$

$A_p$  - soojusülekanne pindala,  $m^2$

$A_{vp}$  - veepinna pindala,  $m^2$

$C_d$  - takistustegur

$c_p$  - gaasi erisoojus,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$

$D_{ab}$  - CO<sub>2</sub> difusiooni koefitsient,  $m^2/s$

$d_{os}$  - tahkete osakeste diameeter,  $m$

$d_{tr}$  - toru sisediameeter,  $m$

$D_{ts}$  - tsükloni maksimaalne diameeter,  $m$

$f$  - hõõrdetegur

$g$  - raskuskiirendus,  $m/s^2$

$h$  - soojuskonvektsiooni koefitsient,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

$h_1$  - veesamba maksimaalne kõrgus,  $m$

$h_{pr}$  - mikrovetikate suspensiooni piirpinna paksus,  $m$

$h_{vesi}$  - mikrovetikate suspensiooni sügavus,  $cm$

$k$  - gaasi soojusjuhtivus,  $W/(m \cdot K)$

$L$  - torude pikkus fotobioreaktori ja korstna vahel,  $m$

$l_{kõõl}$  - veepinna ühe külje pikkus,  $m$

$l_{pikkus}$  - anuma sisepikkus,  $m$

$m_1$  - gaasi massi ülekanne,  $kg/s$

$m_{co2}$  - CO<sub>2</sub> mass ühes mullis,  $g$

$m_{diff}$  - gaasimulli massi ülekanne,  $kg/s$

$m_{rco2}$  - CO<sub>2</sub> kogus reaalse gaasivoolu juures, mis läbib ühte anumad,  $g/h$

$m_{yl1}$  - CO<sub>2</sub> massiülekanne mullist mikrovetikate suspensiooni,  $g/h$

$m_{yl2}$  - CO<sub>2</sub> massiülekanne veepinnast mikrovetikate suspensiooni,  $g/h$

$M_{co2}$  - CO<sub>2</sub> molaarmass,  $g/mol$

$m_{sm}$  - kogu CO<sub>2</sub> massi ülekanne ühes anumad,  $g/h$

$Nu$  - Nusselti number

$Q$  - vooluhulga maht,  $m^3/s$

$Q_{id}$  - teoreetiline ideaalne gaasivool,  $m^3/h$

$Q_{anum}$  - gaasivool ühe reaktori anuma kohta,  $m^3/h$

$R$  - gaasisesestusava raadius reaktoris,  $cm$

$\Re$  - Reynoldsi arv

$r_1$  - gaasimulli siseraadius,  $mm$

$r_2$  - gaasimulli välisraadius,  $mm$

$r_{sil}$  - anuma siseraadius,  $m$

$t_a$  - korstnagaasi algtemperatuur, °C

$t_k$  - keskkonnda temperatuur, °C

$t_p$  - temperatuur erinevates punktides, °C

$v$  - gaasimulli liikumise kiirus,  $cm/s$

$V_{mull}$  - gaasimulli ruumala,  $mm^3$

$V_{rtp}$  - ideaalse gaasi molaarruumala toetemperatuuril,  $l/mol$

$W_1$  - vajalik võimsus rõhulangu ületamiseks,  $W$

$W_2$  - vajalik võimsus veesamba rõhu ületamiseks,  $W$

$w_{seg}$  - segmendi kõrgus, ehk veepinna kaugus anuma laest,  $m$

$\Delta P$  - rõhulang,  $Pa$

$\eta_0$  - õhupumba kasutegur

$\rho_{1a}$  - CO<sub>2</sub> kontsentratsioon mullis alghetkel,  $kg/m^3$

$\rho_{1b}$  - CO<sub>2</sub> kontsentratsioon veepinnal,  $kg/m^3$

$\rho_2$  - CO<sub>2</sub> kontsentratsioon mikrovetikate suspensioonis,  $kg/m^3$

$\rho_g$  - korstnagaasi tihedus,  $kg/m^3$

$\rho_v$  - vee tihedus,  $kg/m^3$

$\sigma$  - vee pindpinevus,  $dynes/cm$

$\nu_{kin}$  - gaasi kinemaatiline viskoossus,  $m^2/s$

$\omega$  - gaasi nurkkiirus,  $rad/s$

$\phi_{mull}$  - CO<sub>2</sub> kontsentratsioon veemullis alghetkel, %

$\phi_{veepind}$  - CO<sub>2</sub> kontsentratsioon veepinnal, %

## SISSEJUHATUS

Täna enimkasutatud kütused, fossiilkütused, on moodustunud miljoneid aastaid maapõues olnud orgaaniliste jäänuste fossiliseerumisest. Täna on need peamiseks energiaallikaks ning nende põletamisel vabaneb biosfääri aineringsse seni seotuna olnud süsinikku. Maa rahvaarvu suurenemine, tõusnud energiakasutus tööstuses ja ka suurenenud igapäevaselt kasutatavate mootorsõidukite hulk on viinud suure globaalse energianõudluse tekkeni [1]. Selle tõttu vähenevad fossiilkütuste varud suure kiirusega. Samas tõstab fossiilkütuste suurenenud tarbimine maa atmosfääri vabanenud kahjulike gaaside hulka.

Biomassist toodetud biokütused võivad olla alternatiiviks fossiilsetele kütustele. Need on taastuvad ressursid, mis on biolagunevad ning olles osaks süsinikdioksiidi ( $\text{CO}_2$ ) looduslikus ringluses on need keskkonnasõbralikumad. Seega, tulevikku silmas pidades, on antud valdkonnas toimuvad uurimistööd väga olulised.

$\text{CO}_2$  paiskamine atmosfääri tõusis järsult pärast tööstusliku revolutsiooni algust, kui leiutati aurumasin. Viimastel aastakümnetel on  $\text{CO}_2$  emissioon maailmas olnud väga suur ja praeguste eelduste kohaselt peaks see veelgi suurenema.  $\text{CO}_2$  emissiooni tõttu on atmosfäärõhus viimase 50 aasta jooksul süsinikdioksiidi hulk tõusnud 0,03 protsendist 0,04 protsendini. Juba praeguseks on selline muutus tekitanud globaalseid probleeme. Ehkki leidub teadlasi, kes suhtuvad järsku globaalset soojenemist ja jääliustike sulamist  $\text{CO}_2$  tõttu lubavatesse ennustustesse skeptiliselt, pole võimalik eitada sissehingatava  $\text{CO}_2$  hulga tõusust tingitud inimeste terviseprobleemide sagenemine. On näidatud, et  $\text{CO}_2$  kontsentratsioon 0.1 % sissehingatavas õhus langetab oluliselt inimese töövõimet [2]. Seega võib eeldada, et lähima paarikümne aasta jooksul suurenevad ka kunstliku ruumide ventilatsiooniga seotud kütusekulud oluliselt.

Töö eesmärgiks on välja töötada siirdesüsteem, mis transpordiks korstnagaasi fotobioreaktorisse, kus selles sisalduv CO<sub>2</sub> seotakse mikrovetikate biomassiga. Saadud biomassiga saaks edaspidi kasutada biokütuse tootmiseks.

Töö raames on kirjeldatud biokütuste, mikrovetikate ja korstnagaasi olemust ja seejärel defineeritud siirdesüsteemi komponendid, mis asetsevad korstna ja fotobioreaktori vahel. Ühtlasi on välja selgitatud fotobioreaktori konstruktsioonist sõltuvalt CO<sub>2</sub> sidumise efektiivsus mikrovetikate suspensiooni.

Töö olulisus seisneb asjaolus, et eelnevat silmas pidades, võiks sarnaste süsteemide arendamine ja kasutusele võtmine tulevikus võimaldada õhku paisatava CO<sub>2</sub> hulga mõningast vähenemist.

Töö käigus defineeritud parameetritele vastavalt konstrueeritakse siirdesüsteem ning tulevikus on kavas testida selle toimimist töö autori poolt varem konstrueeritud bioreaktoris.

# 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

## 1.1. Biokütuse ja biomassi kirjeldus

Biokütus on energeetilisel otstarbel kasutatav orgaaniline aine, mida toodetakse peamiselt biomassist. Biomass kuulub kiiresti taastuvate loodusressursside hulka. Sõltuvalt allikast võivad biokütused olla tahked, vedelad või gaasilised. Sõltuvalt nende tootmiseks kasutatud biomassist ja kütuse olemusest liigitatakse biokütused nelja põlvkonda [1, 3].

Esimese põlvkonna biokütused saadakse biomassist, mida toodetakse suhkrut, tärklisi ja õli sisaldavast toorainest. Selle allikateks on näiteks mais, suhkruroog ja palmiõli. Biokütus saadakse õli sisaldavate taimede seemnetest väljapressitud õli töötlemisel estrifitseerimise teel biodiislikuks. Suhkruid sisaldavad lähteained töödeldakse ümber etüülalkoholiks, mida saab kasutada bensiini lisandina.

Teise põlvkonna biokütuste tootmiseks kasutatakse biomassi, mida toodetakse põllumajanduslikult ning mida ei tarvitata toiduks. Siia kuuluvad erinevad lignotselluloossed materjalid (energiahein, kiire kasvuga puuliigid jne), põllumajanduslikud biojäätmek, tööstuslikud biojäätmek, tahked olmejäätmek jt. Sisuliselt võimaldab biokütuste teise põlvkonna tootmise tehnoloogia lähteainena kasutada suvalist biomassi. Teise põlvkonna biokütuse tootmisel järgneb tselluloosi hüdrolyüsile vabanenud suhkrute fermenteerimine. Saadud alkoholiproducti destilleerimisel saadakse bioetanool, mis on käsitletav biokütusena.

Kolmanda põlvkonna biokütuste allikaks on vetikad ja tsüanobakterid. Nendes toimuvates fotosünteesi reaktsioonideks kasutatakse keskkonnas olevat süsinikku, mis võib olla nii CO<sub>2</sub> kui muude süsinikku sisaldavate toitainete näol. Vetikad ja



tsüanobakterid sisaldavad õli, millest saab toota vastavalt biodiisli ja bioetanooli. Mõlemaid saab kasvatada nii avatud tiikides kui ka kinnistes fotobioreaktorites.

Neljanda põlvkonna biokütuse allikaks on geneetiliselt muundatud organismid, mis võivad olla mikrovetikad, tsüanobakterid, lignotselluloosne materjal ja ka teised suhkrut, tärklis- ning õli sisaldavad organismid. Neljanda põlvkonna biokütuste allika erinevus teistest on see, et kõik kasutatavad organismid on geneetiliselt muundatud [1].

Käesolev töö keskendub kolmanda põlvkonna biokütuste allikaks olevate mikrovetikate kasutamisele kinnises fotobioreaktoris sidumaks korstnagaasis olevat CO<sub>2</sub> biomassi tootmisel.

## **1.2. Biokütuste ajalugu**

Biokütus on kõige esimene kütuse liik, mida inimene on kasutanud. Esialgu kasutati puitu valguse ja soojuse saamiseks, hiljem ka mehaanilise töö tegemiseks. Kuni 19 sajandi lõpuni põhines transport hobustel, mis moodustas 10% kogu energia tarbimisest. Biomass heina kujul söödeti hobustele, mis oli peamine 'kütuse' säilitamise meetod [4].

Algne sise põlemismootori areng toimus biokütuse baasil, kuid nafta avastamisel langes biokütuse kasutus transpordis dramaatiliselt. Täna moodustab transpordiks kasutatav kütus ligikaudu 30% kogu maailma energia tarbimisest [4], millest biokütus vedelkütuse näol moodustab alla 4% [5]. Suurim osakaal vedelkütusest, mis on saadud biomassist, on etanoolil, kuigi alates 1988. aastast on kasutusele võetud ka biodiisli kütus [4].

Täna on traditsioonilise biomassi (puit) osatähtsus maailma energia kasutamisest 9%. See kulub peamiselt toidu valmistamise ja kütmise peale. Biokütuse osakaal kogu maailma energia tarbimisest on 0,8%. Enamuse sellest moodustavad bioetanool (75%) ja biodiisli (22%) [5]. Biokütuse kasutus on siiski globaalselt suurenevas järgus selle tõttu, et fossiilseid kütuseid on aina raskem toota ja biokütuseid aina lihtsam toota.

### 1.3. Mikrovetikad biokütusena

Vetikaid võib liigitada kahte rühma:

- 1) Mikrovetikad, mille alla kuuluvad sinivetikad, ränivetikad ja viburlased. Nende suurus jääb vahemikku 20 kuni 100 mikromeetrit.
- 2) Makrovetikad, mille alla kuuluvad rohevetikad, pruunvetikad ja punavetikad. Nende suurus algab alates 0,1 millimeetrist.

Antud töö keskendub just mikrovetikate kasvatamiseks sobiliku siirdesüsteemi konstrueerimisele.

Mikrovetikad, nagu ka kõik taimed, tarvivad süsinikuühendeid (nt.  $\text{CO}_2$ ) ja toodavad hapnikku. Keskmiselt seob üks kilogramm kuiva mikrovetika massi seob 1,83 kilogrammi  $\text{CO}_2$  [6]. Neid liigitatakse kolme gruppi: autotroofseteks, miksotroofseteks ja heterotroofseteks mikrovetikateks. Esimesed elavad ainult fotosünteesi käigus toodetud energiast, kus süsiniku allikaks on  $\text{CO}_2$  ja energia allikaks päikesevalgus. Heterotroofsed mikrovetikad vajavad lisaks päikesevalgusele ja  $\text{CO}_2$ -le ka muid süsiniku allikaid. Miksotroofsed vetikad on kasvukeskkonna tingimuste suhtes kõige paindlikumad. Nimelt lisatoitainete puudumisel on nad võimelised elama ka vaid  $\text{CO}_2$  ja valguse toel. Lisatoitainete puudumisel aeglustub vaid nende kasv [7].

Mikrovetikate oluline erinevus maismaal kasvatatavatest õlitaimedest on see, et nendes sisaldub tunduvalt rohkem lipiide. Nii võib vetikate õlisisaldus ulatuda 75 protsendini kuivmassist. Lisaks ei vaja mikrovetikad kasvamiseks põllumaad. Need võivad kasvada nii merevees, magevees kui ka reovees.

Võrreldes vetikaidõli tootmiseks kasutatavate taimedega, tarvivad need vähem toitaineid sama koguse õli tootmiseks. Mikrovetikate liigid erinevad omavahel valkude, süsivesikute ja lipiididesisalduse poolest [7]. Antud töö kontekstis on oluline just lipiidide (õli) sisaldus. Nii ongi tabelis 1.1 esitatud erinevate vetikaliikide õlisisaldus [4].

**Tabel 1.1.** Erinevate vetikaliikide õlisisaldus

Mikrovetikas	Õli sisaldus (%)
<i>Botryococcus</i>	25-75
<i>Chlorella</i>	28-32
<i>Cylindrotheca</i>	16-37
<i>Nannochloropsis</i>	31-68
<i>Nitzschia</i>	45-47
<i>Schizochytrium</i>	50-77

Kuigi tabelist olevaid andmeid vaadeldes võib järeldada, et kõige kasulikum oleks biokütuste saamiseks kasvatada mikrovetikaid, mis kuuluvad *Botryococcus* liiki, kasvavad *Chlorella* liigid mitu korda kiiremini [6]. Seetõttu kasvatatakse ja uuritakse teistest mikrovetikatest rohkem just *Chlorella* liike.

Võrreldes mikrovetikate õlisaagikust liitrite hektari kohta (L/ha) erinevate põllumajanduses kasvatatavate taimede õlisaagikusega, näeme väga suuri erinevusi. Vastavad suurused on esitatud tabelis 1.2. Samas on õli ekstraheerimine mikrovetikatest võrreldes maismaa taimedega kasutusel olevate tehnoloogiate abil tunduvalt kulukam (ressursside poolest intensiivsem) ja selle tõttu on mikrovetikate kasutamine õli tootmiseks vähe levinud.

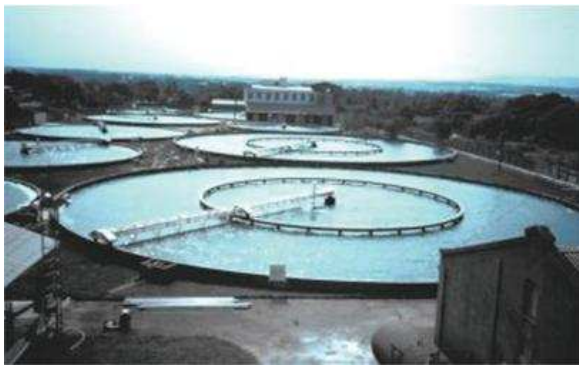
**Tabel 1.2.** Õlisaagikuste võrdlus hektari kohta [8, 9]

Kultuur	Õli saagikus (L/ha)
Mikrovetikas (õli 30%)	58700
Õlipalm	5950
<i>Jatropha</i>	1892
<i>Canola/Raps</i>	1190
Sojauba	446
Mais	172
Päevalill	952

Biomassi saamiseks kasvatatakse vetikaid kahel erineval viisil:

1) Avatud süsteemis, kus gaasi keskkond (õhk) ei ole kontrollitud. Selle kasvatusviisi positiivseteks külgedeks on väiksemad ehituskulud võrreldes kinnise süsteemiga, väiksemad jooksvad kulud ja vajaduse tekkimisel lihtsam tootmismahu tõstmine. Avatud süsteemi negatiivseteks külgedeks on suurem võõrkultuuridega saastumise risk, suurem ruumivajadus, kõrge CO<sub>2</sub> kadu, suur veekulu, madal biomassi kontsentratsioon ja oluliselt suuremad biomassi kokku kogumise/koristamise kulud. Joonisel 1.1. on näidatud kaks näidet avatud süsteemist on ringbassein (A) ja kanalbassein (B).

A)



B)



**Joonis 1.1.** Avatud süsteemi näited, A) ringbassein ja B) kanalbassein [10, 11]

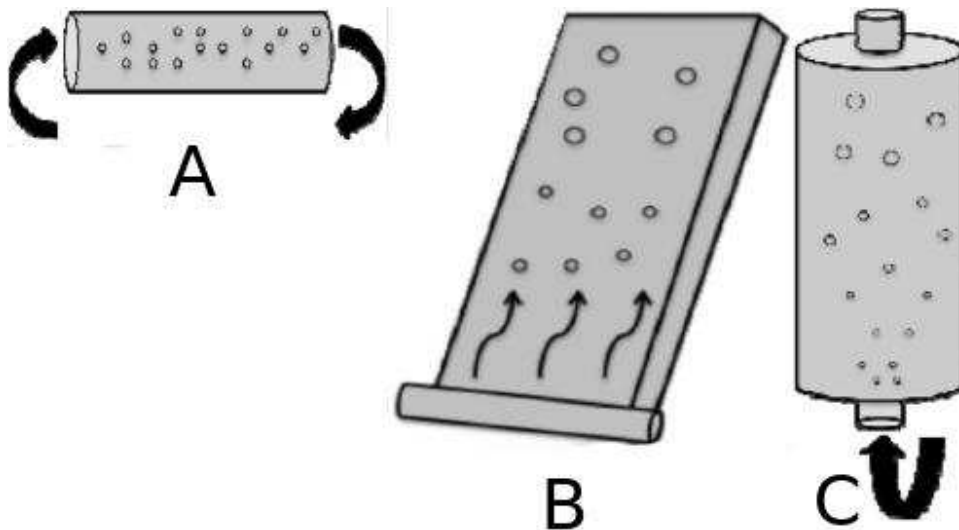
2) Suletud süsteemis on gaasi keskkond kontrollitud. Suletud süsteemi nimetatakse bioreaktoriks. Bioreaktorite positiivseteks külgedeks on väiksem ruumivajadus, kontrollitud materjali kasutus, suurem biomassi kontsentratsioon ja väiksemad koristamise kulud. Negatiivseteks külgedeks on suuremad kapitalikulud, suuremad jooksvad kulud ja keerukamad konstruktsioonid.

Antud töös tegeldakse siirdesüsteemi konstrueerimisega korstnagaasi juhtimiseks suletud bioreaktorisse. Suletud süsteemis on CO<sub>2</sub> bilanss paremini kontrollitav ning selle sidumine mikrovetikatesse täpsemini määratav.

## 1.4. Bioreaktorid.

Antud töö kontekstis räägime bioreaktoritest kui suletud süsteemidest mikrovetikate kasvatamiseks. Bioreaktoreid on mitut tüüpi: torureaktorid (vertikaalsed, horisontaalsed), lameplaatreaktorid, vertikaalsilindrilised reaktorid, polüetüleenkotid ja spiraalsed reaktorid. Erinevatel bioreaktori tüüpidel on erinevad positiivsed ja negatiivsed küljed. Järgnevalt on välja toodud nende olulisemad erinevused. Torureaktoritel on suurim valgustuspindala, kuid väiksem massi ülekanne. Lameplaatreaktoritel on suurem valgustuspindala ja massi ülekanne, kuid raskem üle kanda tööstuslikku mahtu. Vertikaalsilindrilistel reaktoritel on parem massi ülekanne ja väiksemad jooksvad kulud, kuid väiksem valgustuspindala ja need vajavad keerukamaid ehitusmaterjale. Polüetüleenkottidel on madalamad üleüldised kulud, kuid suurem bakteriaalse saastumise risk [7].

Järgnevalt on esitatud mõningate reaktorite joonised, mis illustreerivad nende kuju ja gaasimulli liikumist.



**Joonis 1.2.** Torureaktor (A), lameplaatreaktor (B) ja vertikaalsilindriline reaktor (C) [7]

Nagu jooniselt näha, on gaasimulli liikumise teekond kõige väiksem just horisontaalselt paikneval silindril.

## 1.5. Korstnagaasi sidumine mikrovetikasse

Atmosfäärõhus on CO<sub>2</sub> kontsentratsioon 0,04%. Hetkel on see peamine CO<sub>2</sub> allikas, mida kasutatakse mikrovetikate kasvatamisel. Korstnagaasis võib CO<sub>2</sub> sisaldus olla 6-15% [12], mis on enam kui kaks suurusjärku kõrgem. Seetõttu on ka loogiline, et korstnagaasi saab vaadelda võimaliku CO<sub>2</sub> allikana mikrovetikate kasvatamisel.

CO<sub>2</sub> sidumine ja biomassi toodang varieeruvad sõltuvalt erinevate mikrovetikate liikide omadustest ja kultiveerimissüsteemidest. Erinevad mikrovetikate liigid seovad CO<sub>2</sub> erineva efektiivsusega, mis omakorda määrab ära korstnagaasis sisalduva CO<sub>2</sub> sidumise edukuse. Ideaalne mikrovetikavetika liik peaks olema kõrge CO<sub>2</sub> sidumise võimega, kõrge tolerantsusega CO<sub>2</sub>, toksiliste ainete, temperatuuri ja keskkonna happelisuse suhtes.

Varasemad uuringud on näidanud, et soovitud omadustega mikrovetika liigid on *Scenedesmus obliquus*, *Botryococcus braunii*, *Chlorella vulgaris* ja *Nannochloropsis oculata*. Need liigid sobivad nii CO<sub>2</sub> sidumiseks kui ka biokütuse tootmiseks [1]. Tuleb märkida, et mainitud mikrovetikate suure tootlikkusega näitajad on saadud erinevates katsetingimustes, näiteks erinev valguse intensiivsuse, CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni ja bioreaktori tüübi kasutamisel. Kahjuks pole mikrovetikate liikide võrdlevat uuringut tänaseni tehtud ning nende tootlikkus on esitatud erinevate kasvukeskkonna parameetrite ja kultiveerimissüsteemide kasutamisel [1].

Mikrovetikate kasvatamisel biokütuste tootmiseks on biomassi juurdekasv olulisim parameeter. Samas sõltub mikrovetikate kasv CO<sub>2</sub> kontsentratsioonist. Näiteks *Scenedesmus dimorphuse* kasv 2%-l, 10%-l ja 20%-l olid vastavalt 5,17, 4,51 ja 3,82 grammi liitri kohta päevas. Kuigi biomassi toodang oli kõige parem 2% juures, pole see kõige tähtsam näitaja. Nimelt sõltub mikrovetikate kasvatamiseks valitava CO<sub>2</sub> kontsentratsioon ka CO<sub>2</sub> sidumise majanduslikust aspektist (CO<sub>2</sub> emissiooni riiklikud kvoodid). Kuigi mikrovetikaid saab kasvatada gaasiseguga, milles CO<sub>2</sub> sisaldus ulatub üle 20%, on üldine seisukoht, et üle 5% CO<sub>2</sub> sisaldusega gaasisegu mõjub mikrovetikate

kasvule pigem negatiivselt. Lisaks on näidatud, et peamised mikrovetikate kasvu pärssivad ained korstnagaasis on ennekõike lämmastikoksiid ja vääveldioksiid. Korstnagaasi koostis sõltub põletatud materjalist. Näiteks biomassi põlemisel on vääveldioksiidi kogus gaasis minimaalne võrreldes põlevkivi ja kivisöe põlemisega.

On näidatud, et pidev CO<sub>2</sub> juurdevool mikrovetikate kasvukeskkonda pärsib mikrovetikate kasvu. Nii on tehtud katseid, kus häid tulemusi on andnud pulseeritud CO<sub>2</sub> lisamine, kus 10 sekundi pikkusele CO<sub>2</sub>-ga aereerimisele järgnesid 5-9 minuti pikkused pausid [13].

Kõige paljutootavamad mikrovetikate liigid CO<sub>2</sub> sidumiseks on *Chlorella sp.*, *Scenedesmus sp.* ja *Spirulina* liigid. Esimest planeerime kasutada ka konstrueeritud siirdesüsteemi efektiivsuse testimiseks tulevikus.

## 1.6. Temperatuuri mõju vetikatele

Korstnagaasi üks negatiivsetest omadustest mikrovetikale on selle temperatuur. Kuna korstnagaas tekib põlemisel, siis võib põlemiskambri tuleva gaasisegu temperatuur ulatuda 200 °C kraadini. Seetõttu on vaja gaasi temperatuuri alandada. Selleks on kaks võimalust: jahutada gaasi kunstlikult või lasta gaasil jahtuda loomulikult teel pikendades gaasi teekonda bioreaktorini ning kasutada hea temperatuurijuhtivusega gaasijuhtme materjali.

Mikrovetikad kasvavad kõige paremini 12-30 kraadi juures. Madalama temperatuuri juures aeglustub fotosünteesi protsess ja seega ka CO<sub>2</sub> sidumine kasvukeskkonnast. Kõrgema temperatuuri juures hakkab mikrovetikas vähesel määral tarbima ka hapnikku, mistõttu aeglustub fotosünteesi protsess. On näidatud, et mõningad liigid suudavad taluda ka kuni 40 °C kraadist temperatuuri. *Chlorella* näiteks suudab taluda nii 40 kraadist sooja kui ka 40%-list CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni aereeritavas gaasis [9]. Meie kliimavööndis on

avatud süsteemides mikrovetikate kasvatamise korral probleemiks enamasti liiga madal temperatuur.

## 1.7. Korstnagaasi koostis

Korstnagaasi väljund-parameetrid olenevad tugevalt sellest, missugune on põlemine ja missugust tüüpi kütust kasutatakse. Tabelis 1.3 on esitatud hapniku kogus pärast põlemist vastavalt kütuse-, põlemise iseloomule ja liigõhutegurile.

**Tabel 1.3.** Kütuse-, põlemise iseloom ja hapniku kogus korstnagaasis [14]

Kütuse ja põlemise iseloom	Liigõhutegur	Hapnik, %
Lahtine kamin	>3	>14
Puuahi	2,1-2,3	11-12
Hakkepuit	1,4-1,6	6-8
Pelletid (kaugküte)	1,2-1,3	4-5
Soojuselektrijaam (puutolm)	1,1-1,2	2-3

Liiga väikse liigõhuteguri korral väheneb hapniku kogus ja suureneb ka süsinikmonooksiidi kogus. Normaalsel põlemisel jääb tekkiva CO<sub>2</sub> kogus vahemikus 6 kuni 18 %.

Lisaks CO<sub>2</sub>-le saab põlemise käigus tekkida ka tõrvatahm. Tõrvatahm võib tekkida siis, kui veeauru temperatuur suitsugaasis langeb alla 50 kraadi. Kondensatsioon tekib tavaliselt korstna kõige külmemates punktides. Tõrvatahma tüüpilisteks tekkimise põhjusteks on halvasti soojustatud korsten, suitsugaasi madal temperatuur ja mittetäielik põlemine. Seega peab torusid, mida läbib korstnagaas, regulaarselt puhastama või



tekitama süsteemi, mis puhastaks tahmast automaatselt. Seda probleemi tuleb arvesse võtta ka siirdesüsteemi konstrueerimisel.

Vastavalt kütusele saab välja arvutada, mis on maksimaalne CO<sub>2</sub> kogus, mis võib korstnagaasis tekkida. Vastavad näitajad on näidatud tabelis 1.4, mis on modifitseeritud võrreldes allikaga.

**Tabel 1.4.** Võimalik maksimaalne CO<sub>2</sub> kogus vastavalt kütusele [15]

Kütus	CO <sub>2</sub> kontsentratsioon (%)
Kütteõli	15,4
Maagaas	11,9
Vedelgaas	13,9
Puukoks	20
Brikett	19,3
Pruunsüsi	19,2
Kivisüsi	18,5

Nagu näha, on kõige suurem maksimaalne CO<sub>2</sub> tootmine just puukoksil, kuna selle materjaliga on võimalik täielikum põlemine.

## 1.8. Mikrovetikad ja korstnagaas

Erinevad mikrovetika kultuurid tarbivad süsihappegaasi erineva kiirusega. Erinevad allikad näitavad erinevat maksimaalset CO<sub>2</sub> tarbimist. Varasemates uuringutes on näidatud, et *Chlorella* suudab tarbida maksimaalselt 17,2 grammi CO<sub>2</sub> liitris ühe päeva kohta, kui korstnagaasis on süsihappegaasi 15% [16]. Teine allikas väidab, et *Chlorella* suudab ühes päevas tarbida vaid 0,1 grammi CO<sub>2</sub> liitri kohta [17]. Meie senised katsed mikrovetikate kasvatamisel bioreaktoris, kuhu juhitakse kontrollitud CO<sub>2</sub> sisaldusega gaasisegu, on näidanud esimese viidatud allikaga lähedasemaid tulemusi.

Vees sisalduv CO<sub>2</sub> suurendab selle happelisust. Erinevate mikrovetika kultuuride pH taluvus võib olla erinev. Näiteks *Synechococcus* sp. kasvab kõige paremini pH 6,8 juures ent *Spirulina platensis* jaoks on optimaalne pH väärtus 9. Kui korstnagaasis on vääveldioksiidi, võib see keskkonna happelisust veelgi rohkem tõsta. Seega tuleks mikrovetikate kasvukeskkonnaks oleva vee happelisust regulaarselt kontrollida.

## **1.9 Siirdesüsteemi definitsioon**

Käesolevas töös peame siirdesüsteemi all silmas süsteemi, mis jäävad korstnagaasi tekkekoha ja mikrovetikaid sisaldava fotobioreaktori vahele.

Siirdesüsteem on vajalik küttekoldes tekkinud korstnagaasi ja selles sisalduva CO<sub>2</sub> juhtimiseks mikrovetikatega bioreaktorisse samal ajal gaasisegu puhastades ja mikrovetikate jaoks sobivale temperatuurile jahutades.

## 2. SIIRDESÜSTEEM

### 2.1. Siirdesüsteemi nõuded

Siirdesüsteemi nõuded tulenevad Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudis ehitatud fotobioreaktori, mis on esitatud joonisel 2.1, parameetritest ja asukohast ning nullkorrusel asetseva katlalabori parameetritest ja asukohast.



**Joonis 2.1.** Fotobioreaktor

Siirdesüsteemi jaoks olulised kasutatava fotobioreaktori parameetrid on järgmised:

- 1) Kasutatava bioreaktori tüübiks on horisontaalselt paigutatud silindriline fotobioreaktor.
- 2) Reaktor koosneb kolmes anumast, millest igaühe maht on 100 liitrit (L), seega kogumaht on 300 L.
- 3) Iga anuma diameeter on 300 mm (sisediameeter on 290 mm).
- 4) Gaasitoru, mis läbib tervet reaktorit, välisdiameeter on 12 mm ja sisediameeter on 10 mm. Pikkus on 1,9 meetrit.

Fotoreaktorit ühte anumast läbiva gaasi hulga mõõtmiseks kasutati gaasimõõturit Itron G6 RF1 (valmistusaasta 2016.), mis on näidatud joonisel 2.2. Selle gaasivoolu mõõtepiirkond on 0,06 kuni 10 kuupmeetrit tunnis. Gaasi temperatuur peab olema vahemikus -10 kuni 40 kraadi.



**Joonis 2.2.** Gaasimõõtur Itron G6 RF1

Fotobioreaktori ühte anumast läbiva gaasisegu koguseks mõõdeti 0,000208 kuupmeetrit õhku sekundis, mis on 750 liitrit tunnis (L/h). Seega teeb see terve fotobioreaktori kohta 0,000625 kuupmeetrit õhku sekundis, mis on 2250 L/h.

Siirdesüsteemi jaoks olulised katlalabori parameetrid on järgmised:

- 1) Katla kütuseks on pelletid.
- 2) Katsete põhjal on kütuse (pelletite) põlemise kiirus 5,24 kg tunnis.

Kuna kütuseks on pelletid, peab defineerima, mis on selle kütuseliigi koostis. Pelletites on süsinikku 46%, vesinikku 6%, hapniku 40%, tuhka 1%, väävlit 0,05%, lämmastikku 0,28% ja vett 7%. Sellest tulenevalt on veeauru sisaldus 11-12%. Sellest tulenevalt saab välja arvutada ka süsihappegaasi koguse, mis põlemisel tekib. Ühe kilogrammi kütuse täieliku põlemise juures tekib CO<sub>2</sub> 3,69 kg [14].

Katseliselt on määratud mõningad korstnagaasi parameetrid, kui kütuseks olid pelletid: Keskmine korstnagaasi temperatuur oli 210 °C kraadi, keskmine hapniku sisaldus oli 5,4% ja keskmine CO<sub>2</sub> sisaldus oli 15,1%. Määrati keskmine kastepunkt, mis tekib 51,5 °C kraadi juures. Siinjuures peab märkima, et katseliselt oli kütus põletatud optimaalse kütuse koguse juures. Kui konstrueeritud siirdesüsteem saab füüsiliselt valmis, siis põletatakse kütus vähem optimaalsemalt, kus korstnagaasi temperatuur näiteks võib langeda 100 kraadini. Siiski võetakse esitatud arvutuste juures aluseks maksimaalne korstnagaasi temperatuur, et tagada süsteemi töökindlus.

## **2.2. Siirdesüsteemi komponendid**

Vastavalt nõuetele on defineeritud siirdesüsteemi komponendid, mis tulevad korstna ja fotobioreaktori vahele.

### **2.2.1. Tahkete osakeste eraldamise seade**

Esimene nõue on eraldada korstnagaasist enamus tahketest osakestest. Tahkeid osakesi võib eraldada mitmel viisil.

1. Separatuurid inertsi baasil (tsüklon, sadestuskamber, keeriskamber);
2. Kottfiltrid;
3. Elektrostaatilised püüdurid;
4. Märgraberid.

Antud töös valiti osakeste eraldamiseks tsüklonseade. See süsteem eraldab tahkeid osakesi tsentrifugaaljõu abil. Gaasis sisalduvate suurematele osakestele mõjuvad

suuremad inertsiõud ja seega eralduvad need gaasivoolust tsükloni seintele ning sealt edasi alluvad gravitatsioonile ning langevad tolmu kogurisse. Tsüklonid suudavad eraldada osakesi, mille diameeter on vähemalt 10 mikromeetrit [18]. Ehkki märgskraberid võimaldavad eraldada osakesi, mille diameeter algab 5 mikromeetrist, nõuavad need suuremat hooldamist, mistõttu välistati nende kasutamine antud siirdesüsteemi konstrueerimisel.

Järgnevalt arvutati tsükloni maksimaalne diameeter, mille puhul eralduks enamus tahketest osakestest, mis on suuremad kui 20 mikromeetrit. Sellise suurusega osakeste gaasivoost eraldamiseks peaks nurkkiirus tsüklonis olema [18]:

$$\omega \approx \frac{10^{-8}}{d_{os}^2} = \frac{10^{-8}}{(20 \cdot 10^{-6})^2} = \frac{10^{-8}}{400 \cdot 10^{-12}} = \frac{1}{0,04} = 25 \text{ rad/s}, \quad (2.2.1.1.)$$

kus  $\omega$  on gaasi nurkkiirus, rad/s;

$d_{os}$  – tahkete osakeste diameeter, m.

Järgnevalt arvutatakse tsüklonisse tuleva gaasi kiirus [18]:

$$v = \frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot d_{tr}^2} = \frac{0,000625 \cdot 4}{3,14159 \cdot 0,01^2} = 7,96 \text{ m/s}, \quad (2.2.1.2.)$$

kus  $Q$  on vooluhulga maht,  $m^3/s$ ;

$d_{tr}$  – toru sisediameeter, m.

Järgnevalt arvutatakse tsükloni maksimaalne diameeter [18]:

$$D_{ts} = \frac{2 \cdot v}{\omega} = \frac{2 \cdot 7,96}{25} = 0,637 \text{ m}, \quad (2.2.1.3.)$$

kus  $D_{ts}$  on tsükloni maksimaalne diameeter, m.

Konstruktiiivsetel põhjustel võiks tsükloni sisediameetri vähendada 0,13 meetrini. Seejuures suureneb ka nurkkiirus ja väheneb osakeste suurus, mida eraldatakse. Nurkkiiruseks tuleb 122,5 rad/s. Arvutatud minimaalne eraldatavate osakeste läbimõõt tuleb 9 mikromeetrit, kuigi realselt eraldatakse osakesed läbimõõduga alates 10st mikromeetrist.

Kuna vastavate mõõtmetega tsüklonit pole kaubandusest võimalik saada, siis otsustati see ise konstrueerida. Vajalikule tsüklonile esitatavad nõuded on tingitud väga väikesest süsteemi läbivast õhuvoolust ajaühiku kohta. Turul olevate tsüklonite diameetrid on suuremad, mis on mõeldud palju suuremate õhuvoolude jaoks. Meie süsteemis on

õhuvoolu suurus 0,000625 kuupmeetrit sekundis ja väikseimate tsüklonite puhul on õhuvool alates 0,5 kuupmeetrit sekundis.

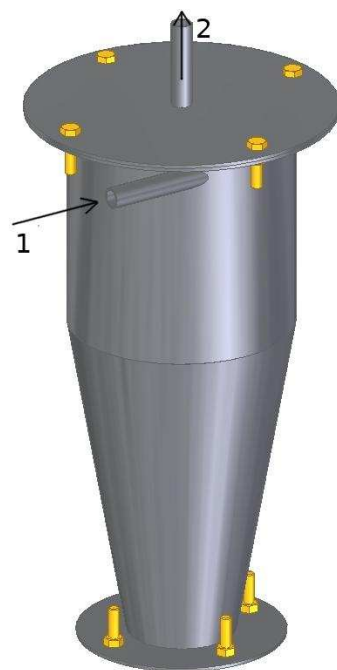
Järgnevalt tehti patendiuring erinevate tsüklonite konstruktsioonide kohta, tagamaks optimaalseima lahenduse väljatöötamist. Järgnevalt on esitatud mõningad patendid, mille puhul on eraldi välja toodud ka patenteeritud süsteemide meie jaoks olulisimad positiivsed ja negatiivsed omadused.

1. **US 2016/0367098 A1.** Antud seade meenutab oma töö põhimõttelt tolmuimejat, kus kasutatakse tsentrifugaaljõudu, ehk tsüklonmeetodit, osakeste eraldamiseks. Tsüklonil on välisseinte sisekülgedel ribad, mis suunavad õhku nii, et teoreetiliselt toimuks osakeste maksimaalne eraldumine. Ribid on paigutatud heeliksikujuliselt. Kahjuks pole patendis näidatud arvutusi ning nende ribide efektiivsus ei ole teada. Antud tsüklonil on väljundi jaoks ehitatud toru, mis pikendab õhuvoolu teekonda [19].

2. **US 2016/0375447 A1.** Antud seade kujutab endast tsentrifugaaljõudu kasutatavat eraldajat. Seade kasutab elektrostaatilist voolu, et siduda osakesed tsükloni keskel paiknevale vardale. Süsteemi positiivseteks küljeks on see, et õhk siseneb madalamalt kui väljub ja seetõttu on osakeste eraldumine suurem. Miinuseks on see, et antud keskmine varras vajab regulaarset käsitsi liigutamist osakeste maha kraapimiseks varda pinnalt, mis suurendab hoolduskulusid. Lisaks saavad elektrostaatilise laengu puudumise korral osakesed vardalt uuesti lahti tulla, mis võib vähendada väljundõhu puhtust [20].

3. **US 2016/0206169 A1.** Antud seade on konstrueeritud kui kaksiktsüklonite süsteem, kus sisendõhk läheb esimesse välistsüklonisse ja sealt suundub õhk nelja sisetsüklonisse. Süsteemi positiivne külg on see, et antud süsteem suurendab osakeste eraldumise efektiivsust. Nii kuhjuvad eraldunud raskemad osakesed välistsükloni põhja ja väiksemad osakesed langevad sisetsüklonite põhja. Süsteemi negatiivseks küljeks on selle kompleksus ja kapitalikulud [21].

Planeeritava tsükloni joonis on lisatud LISA A, kus on näidatud tsükloni konstruktsioon. Valitud tsükloni mõõtmed on tulnud allikatest, mis defineerivad silinderkambri ja koonuskambri pikkuse [22]. Antud tsükloni konstruktsiooni lihtsus võimaldab vähendada kapitalikulusid. Tsükloni põhjal klapi puudumise põhjuseks on see, et tagasivoolu vähendamiseks piisab sellest, kui koonuse tipu diameeter on piisavalt väike. Erinevate detailide liitmiseks sobib nii keevisliide kui ka liimliide, kuna temperatuur tsüklonis jääb eeldatavasti 50 °C kraadi lähedusse (kastepunkti lähedus). Antud töös kasutame tsükloni hermeetilisuse tagamiseks liimliidet. Joonisel 2.3. on näidatud tsükloni mudel.



**Joonis 2.3.** Tsükloni mudel. (1) sisendõhk; (2) väljundõhk

Tsükloni mudelijoonele on näha sisendõhu ja väljundõhu liikumist.

### 2.2.2. Õhupumba vajaliku võimsuse arvutus ja valik

Gaasi korstnast bioreaktorisse viimiseks on vaja seda pumbata. Järgnevalt on esitud arvutused minimaalse vajaliku pumba võimsuse leidmiseks pumpamaks gaasi korstnast fotobioreaktorisse. Seda arvutatakse järgmise valemiga [23]:



$$W_1 = \frac{m_1 \cdot \Delta P}{\rho_g}, \quad (2.2.2.1)$$

kus  $W_1$  on vajalik võimsus rõhulangu ületamiseks, W;  
 $m_1$  – gaasi massi ülekanne, kg/s;  
 $\Delta P$  – rõhulang, Pa;  
 $\rho_g$  – korstnagaasi tihedus, 1,28 kg/m<sup>3</sup>.

Rõhulangu arvutatakse valemiga [23]:

$$\Delta P = \frac{f \cdot L \cdot \rho_g \cdot v^2}{d_{tr} \cdot 2}, \quad (2.2.2.2)$$

kus  $f$  on hõõrdetegur;  
 $L$  – torude pikkus fotobioreaktori ja korstna vahel, 55, (m).

Hõõrdeteguri arvutatakse valemiga [23]:

$$f = \frac{64}{\Re}, \quad (2.2.2.3)$$

kus  $\Re$  on Reynoldsi arv.

Reynoldsi arvu arvutatakse valemiga [23]:

$$\Re = \frac{v \cdot d_{tr}}{\nu_{kin}}, \quad (2.2.2.4)$$

kus  $\nu_{kin}$  on gaasi kinemaatiline viskoossus, 0,0000317.

Gaasi massi ülekanne arvutatakse valemiga [23]:

$$m_1 = \rho_g \cdot A_c \cdot v, \quad (2.2.2.5)$$

kus  $A_c$  on toru ristlõige, m<sup>2</sup>.

Toru ristlõiget arvutatakse valemiga:

$$A_c = \frac{\pi \cdot d_{tr}^2}{4} = \frac{3,14159 \cdot 0,01^2}{4} = 0,0000785 \text{ m}^2, \quad (2.2.2.6)$$

Massiülekanne tuleb:

$$m_1 = 1,28 \cdot 7,962 \cdot 0,0000782 = 0,0008 \text{ kg/s}.$$

Asendades ja taandades liikmeid valemities 2.2.2.3 kuni 2.2.2.6, saab võimsuse valemiks rõhulanguse ületamiseks, mida saab nüüd otse arvutada:

$$W_1 = 8 \cdot \rho_g \cdot \pi \cdot \nu_{kin} \cdot L \cdot v^2 = 3,55W. \quad (2.2.2.7)$$

Võimsuse teine komponent, mida on vaja veesamba rõhu ületamiseks, arvutatakse valemiga [24]:

$$W_2 = \rho_v \cdot h_1 \cdot g \cdot Q = 1000 \cdot 1 \cdot 9,81 \cdot 0,000625 = 6,13W, \quad (2.2.2.8)$$

kus  $W_2$  on vajalik võimsus veesamba rõhu ületamiseks, W;

$\rho_v$  – vee tihedus,  $1000 \text{ kg/m}^3$ ;

$h_1$  – veesamba maksimaalne kõrgus, 1 m;

$g$  – raskuskiirendus,  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

Veesamba maksimaalne kõrgus on võetud üheks meetriks selle tõttu, et tulevikus võib katseid läbi viia ka nii, et fotobioreaktori anumad on gaasiliselt ühendatud jadaühenduses. Kuna ühe anuma veesamba kõrgus on 0,27 meetrit, siis kolme anuma veesamba kõrgus on 0,81 meetrit. Üks meeter on võetud varuga. Antud valemis oli mikrovetikate suspensiooni tihedus asendatud vee tihedusega, kuna need tihedused ei erine teineteisest oluliselt.

Üldine vajalik võimsus arvutatakse valemiga:

$$W = \frac{W_1 + W_2}{\eta_{\delta}} = \frac{3,55 + 6,13}{0,90} = 10,8 \text{ W}. \quad (2.2.2.9)$$

kus  $\eta_{\delta}$  on õhupumba kasutegur, 0,90.

Õhupumba võimsus peaks olema teoreetiliselt vähemalt 10,8 W, kuid arvutustes ei arvestatud kohttakistusi, mis tekivad tsüklonis, fotobioreaktoris ja muudes punktides. Seega peaks kasutatav õhupump olema vähemalt kaks korda suurema võimsusega, 20 W. Antud õhupump peaks tagama ka piisava vasturõhu. Ühe meetri kõrguse veesamba rõhu ületamiseks on vaja vähemalt 10 kPa.

Vastavalt neile kahele nõudele valiti õhupump, mille tehnilised andmed on toodud välja tabelis 2.1 ja mille pilt on näidatud joonisel 2.4.

**Tabel 2.1.** Õhupumba TLD-40AC tehnilised andmed

Mudel	Väljalaske ava (mm)	Sagedus (Hz)	Mootori võimsus (W)	Õhuvoolu hulk (L/min)	Nimisurve (kPa)	Surve (kPa)	Tühikaal (kg)
TLD-40AC	18	50/60	38/35	46/45	12,7	37,3/43,1	5,4



**Joonis 2.4.** Õhupump TLD-40AC

Joonisel 2.4. on näha veepumba peal ka tagasivooluklapp, mis hoiab vett tagasi voolamast õhupumpa. Tagasivooluklapp on süsteemis lisatagatis, kuna torud asuvad enamasti bioreaktoritst üleval pool.

### 2.2.3. Andurite spetsifikatsioon

Õhupumba optimaalse töörežiimi valimiseks oleks vaja kahte samaaegselt töötavat andurit, mis mõõdavad korstnagaasis  $\text{CO}_2$  kontsentratsiooni. Siirdesüsteemi töö efektiivsuse jälgimiseks ja kontrollimiseks on vaja , et üks andur paikneks korstnas ja teine torus pärast korstnat. Esimene andur kontrollib, et  $\text{CO}_2$  ei väljuks korstnast. See tähendab, et suurema  $\text{CO}_2$  kontsentratsiooni juures hakkab õhupump rohkem tööle. Teine andur kontrollib, et sisendtorusse ei pumbataks väiksema  $\text{CO}_2$  sisaldusega õhku. See tähendab, et väiksema  $\text{CO}_2$  sisalduse korral töötab õhupump vähem.

Kuna  $\text{CO}_2$  andurid on kallimad kui hapniku andurid ja põlemisel asendub õhus olev hapnik süsihappegaasiga, siis eeldatakse, et süsihappegaasi võib mõõta kaudselt ka hapnikuanduri kaudu. Hapnikuandur, mis on tuntud kui lambdaandur, mõõdab tegelikult

korstnagaasis ja õhus oleva hapnikuhulga erinevust [25]. Joonisel 2.5. on näidatud üks kasutatav tsirkoonium-hapnikuandur, mis töötab elektrokeemilisel põhimõttel. Nimelt reageerib tsirkoonium hapnikuga, tekitades pinge ja kahe pinge erinevusega (teine mõõde võetakse atmosfäärõhust) saab välja arvutada hapniku sisalduse ja seejärel süsihappegaasi sisalduse. Antud andur vajab töötemperatuuri 300 °C kraadi ja anduri komplektis on juba olemas lokaalne küttekeha. Seega on vaja andurile anda 12 V pinget. Katseliselt on vaja määrata, kui palju mõjutab antud andur gaasisegu temperatuuri transporttorudes. Samuti on vaja andureid eraldi kalibreerida, kuna temperatuurid võivad erineda sellest, mis on tavaliselt autodel summutites.



**Joonis 2.5.** Tsirkoonium hapnikuandur

Antud projektis näeme ette, et vaja on ainult ühte hapnikuandurit, kuna vajalikud vooluhulgad bioreaktorisse on suhteliselt väikesed ja seega korstnasse andurit ei tule.

### 2.3. Siirdesüsteemi temperatuuri arvutus

Kuna korstnagaasi temperatuur, mis tuleb välja põlemiskambrist, võib ulatuda 210 °C kraadini, siis võib see mõjutada gaasi temperatuuri, mis jõuab fotobioreaktorisse. Ka on tähtis välja arvutada, kui kaugel peaks õhupump asetsema katlast, kuna õhupumba sisendõhk ei tohiks olla üle 40 kraadi.

Järgnevalt arvutatakse gaasi temperatuur erinevates punktides vastavalt kaugusele korstnast [23]:

$$t_p = t_k - (t_k - t_a) \cdot e^{(-h \cdot A_p / m_1 \cdot c_p)}, \quad (2.3.1)$$

kus  $t_p$  on temperatuur erinevates punktides, °C;  
 $t_k$  – keskkonna temperatuur, 22 C;  
 $t_a$  – korstnagaasi algtemperatuur, 210 C;  
 $h$  – soojuskonvektsiooni koefitsient,  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ;  
 $A_p$  – soojusülekanne pindala,  $m^2$ ;  
 $c_p$  – gaasi erisoojus,  $1036,3 J/kg \cdot ^\circ C$  [23].

Soojusülekanne maksimaalne pindala leitakse valemiga [23]:

$$A_p = \pi \cdot L \cdot d_{tr} = 1,728m^2. \quad (2.3.2)$$

Soojuskonvektsiooni koefitsient leitakse valemiga [23]:

$$h = \frac{k \cdot Nu}{d_{tr}} = \frac{0,0364 \cdot 4,26}{0,01} = 15,51 W/m^2 \cdot K, \quad (2.3.3)$$

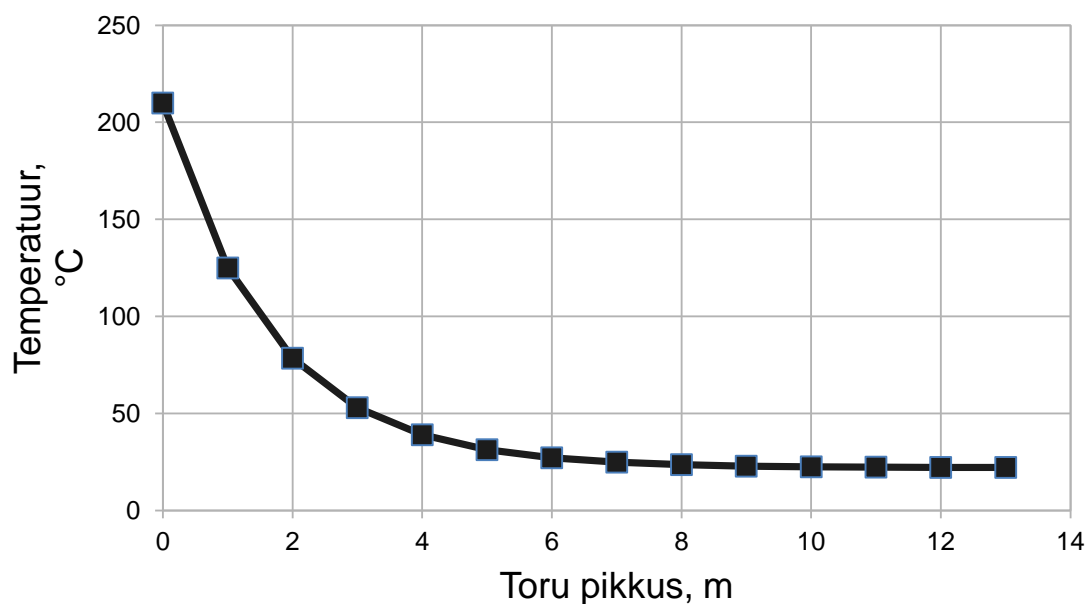
kus  $k$  on gaasi soojusjuhtivus,  $0,0364 W/m \cdot K$ ;  
 $Nu$  – Nusselti number, 4,36 [23].

Gaasi temperatuur fotobioreaktorisse jõudmisel on:

$$t_p = 22 - (22 - 210) \cdot e^{(-15,51 \cdot 1,728 / (0,0008 \cdot 1036,3))} = 22 - (-188) \cdot e^{(-33,08)} = 22 + 0 \\ = 22C$$

Teine pool valemist tuleb väga nullilähedane (astmes miinus 13), seetõttu võib selle võtta nulliks.

Joonisel 2.6. on näidatud gaasi temperatuuri muutust torus vastavalt selle kaugusele korstnast. Valemitest lähtudes on muutujaks  $L$ , toru pikkus soojusülekanne pindala valemis.



**Joonis 2.6.** Gaasi temperatuuri muutus vastavalt toru pikkusele.

Kuna õhupumba sisendõhk peaks olema väiksem kui 40 kraadi, siis teoreetiliselt sobiks õhupumba asukohaks 4 meetri kaugusel korstnast, kus temperatuur on 39 kraadi. Siiski võib sisendõhu temperatuuriks varuga 25 kraadi, mille kaugus korstnast tuleb 7 meetrit.

Kuna gaasi kastepunkt on 51 kraadi ja tsükloni osakesed eralduvad paremini just siis, kui tekib kondensatsioon [18], siis võiks tsükloni asetada enne seda, kui gaas jahtub 51 kraadini. Arvutuste järgi on temperatuur 53 °C kraadi, kui gaas on 3 meetri kaugusel korstnast, seega asetatakse tsüklon selle kaugusele. Sellist tsükloni kaugust toetab ka see, et varasemalt on näidatud, et gaasi temperatuuri tõustes langeb osakeste eraldamise efektiivsus [26].

Temperatuuri arvutuste juures pole arvestatud torude soojustakistust, kuna torude materjaliks on metall ja selle soojustakistus on väga väike, mistõttu muudaks temperatuuri profiili väga vähe. Plasttorude kasutusele võtmisel tuleks temperatuuri arvutuste juures arvestada ka soojustakistusega.

Kuna gaasi jahtumisel tekib kondensatsioon, siis tuleb enne õhupumpa paigaldada kondenseeritud jääkvee-eraldaja. See suurendab õhupumba töökindlust ja vähendab torude roostetamist.

## 2.4. Siirdesüsteemis ja fotobioreaktoris gaasi massivoo arvutused

Selleks, et teada saada optimaalse gaasivoolu koguse bioreaktoris ja reaktori konstruktsiooni sobivuse optimaalse gaasivoolu juures, tuleb teha mõningad gaasi massivoo arvutused.

Esiteks leitakse reaktoris gaasimulli ruumala ja mulli raadius eeldades, et mull on kerakujuline [27]:

$$V_{mull} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma}{g \cdot (\rho_v - \rho_g)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,015 \cdot 72,7}{980,7 \cdot (0,998 - 0,000128)} = 0,007 \text{ cm}^3 = 7 \text{ mm}^3, \quad (2.4.1)$$

kus  $V_{mull}$  on gaasimulli ruumala,  $\text{cm}^3$ ;

$R$  – gaasisestusava raadius reaktoris, 0,015 cm;

$\sigma$  – vee pindpinevus, 72,7 dynes/cm [28].

Lähtudes kera valemist võime nüüd tuletada gaasimulli raadiuse:

$$r_1 = \frac{\left(\frac{6 \cdot V_{mull}}{\pi}\right)^{0,33}}{2} = 0,118 \text{ cm} = 1,18 \text{ mm}, \quad (2.4.2)$$

kus  $r_1$  on gaasimulli siseraadius, mm.

Selleks, et teada saada gaasimulli viibeag bioreaktoris, on vaja leida gaasimulli liikumise kiirus [29]:

$$v = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot 2 \cdot a \cdot (\rho_v - \rho_g)}{3 \cdot C_d \cdot \rho_v}} = \sqrt{\frac{923,7}{1,3473}} = 26,2 \text{ cm/s}, \quad (2.4.3)$$

kus  $C_d$  on takistustegur, 0,45.

Sellest tulenevalt saame teada gaasimulli viibeaga veekeskkonnas:

$$\frac{h_{vesi}}{v} = \frac{26}{26,2} = 1 \text{ s}, \quad (2.4.4)$$

kus  $h_{vesi}$  on mikrovetikate suspensiooni sügavus, 26 cm.

CO<sub>2</sub> massi ülekande leidmiseks fotobioreaktoris tuleb arvutada massi ülekanne ühest mullist veekeskkonda ajaühikus, kus tuleb arvutada ennekõike süsihappegaasi kontsentratsioon mullis:

$$\rho_{1a} = \frac{0,15 \cdot M_{CO_2}}{V_{mol}} = \frac{0,15 \cdot 44,01}{24} = 0,275 \text{ kg/m}^3, \quad (2.4.5)$$

kus  $M_{CO_2}$  on süsihappegaasi molaarmass, 44,01 g/mol;

$V_{rtp}$  – ideaalse gaasi molaarruumala toatemperatuuril, 24 l/mol.

Järgnevalt saab nüüd arvutada massi ülekanne ühest mullist veekeskkonda ajaühikus [23]:

$$m_{diff} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot D_{ab} \cdot (\rho_{1a} - \rho_2)}{r_2 - r_1} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 0,001188 \cdot 0,001288 \cdot 2 \cdot (0,275 - 0)}{(0,001288 - 0,001188) \cdot 10^9} = 1,06 \cdot 10^{-10} \text{ kg/s}, \quad (2.4.6)$$

kus  $m_{diff}$  on massi ülekanne, kg/s;

$r_1$  – gaasimulli siseraadius, 0,001188 m;

$r_2$  – gaasimulli välisraadius, 0,001288 m [23];

$D_{ab}$  – CO<sub>2</sub> difusiooni koefitsient,  $2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  [23];

$\rho_{1a}$  – CO<sub>2</sub> kontsentratsioon mullis alghetkel, 0,275 kg/m<sup>3</sup>;

$\rho_2$  – CO<sub>2</sub> kontsentratsioon mikrovetikate suspensioonis, 0 kg/m<sup>3</sup>.

Süsihappegaasi kontsentratsioon mikrovetika suspensioonis võetakse nulliks, kuna eeldatakse, et kogu süsihappegaas tarbitakse mikrovetikate poolt ära.

Antud massi ülekanne on arvatud ainult ühele mullile. Arvestades seda, et keskmiselt tuleb ühest gaasiavast välja kuni 10 mulli sekundis ja gaasiavasid on anumas 95, siis ühe anuma kohta on süsihappegaasi massi ülekanne:

$$m_{y1} = 1,06 \cdot 10^{-10} \cdot 10 \cdot 95 = 1 \cdot 10^{-7} \text{ kg/s} = 0,36 \text{ g/h}, \quad (2.4.7)$$

kus  $m_{y1}$  on gaasimullide massiülekanne veekeskkonda, g/h.

Samamoodi saab välja arvutada gaasivoolu koguse, mis läbib ühe reaktori anuma eeldades, et ühest gaasiavast lastakse läbi 10 mulli sekundis:

$$Q_{anum} = V_{mull} \cdot 10 \cdot 95 = 6,65 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} = 0,024 \text{ m}^3/\text{h}, \quad (2.4.8)$$

kus  $Q_{anum}$  on gaasivool ühe reaktori anuma kohta, m<sup>3</sup>/h.

Siin leitud gaasivool on 30 korda väiksem kui reaalne gaasivool, mida on meie fotobioreaktoris seni katsetatud. Suurema gaasivoolu juures oleksid arvutused teistsugused, kuna siis on suurem tõenäosus gaasimullide liitumiseks oma teekonnal ja



seega väheneks massi ülekande efektiivne pindala, mis muudaks arvutused palju keerukamaks.

Lisaks massiülekandele mullist vette, mulli teekonnal veepinnale, toimub massi ülekande ka bioreaktoris olevast gaasist läbi vee piirpinna. Selleks arvutatakse massiülekanne anuma veepinnalt, kus CO<sub>2</sub> kontsentratsioon on erinev sellest, mis tuleb bioreaktori sisse läbi gaasitoru. Kõigepealt arvutatakse CO<sub>2</sub> mass ühes mullis:

$$m_{CO_2} = \frac{M_{CO_2} \cdot V_{mull} \cdot \phi_{mull}}{V_{rtp}} = \frac{44,01 \cdot 7 \cdot 10^{-6} \cdot 0,15}{24} = 1,92 \cdot 10^{-6} g, \quad (2.4.9)$$

kus  $m_{CO_2}$  on CO<sub>2</sub> mass ühes mullis, g;

$\phi_{mull}$  – kontsentratsioon veemullis alghetkel, 15 %.

Siis saab välja arvutada, kui suur on süsihappegaasi kontsentratsioon veepinna kohal:

$$\phi_{veepind} = \phi_{mull} - \frac{\phi_{mull} \cdot m_{diff}}{m_{CO_2}} = 15 - \frac{15 \cdot 1,06 \cdot 10^{-7}}{1,92 \cdot 10^{-6}} = 14,2\%, \quad (2.4.10)$$

kus  $\phi_{veepind}$  on CO<sub>2</sub> kontsentratsioon veepinnal, %.

Kuna mikrovetikad tarbivad CO<sub>2</sub> ja toodavad hapniku, siis väheneva CO<sub>2</sub> kontsentratsiooniga kaasneb hapniku kontsentratsiooni tõus.

Edasi on vaja arvutada veepinna pindala veepinna kohal. Selleks leiame esmalt ühe külje pikkuse [30]:

$$l_{kõõl} = 2 \cdot \left( w_{seg} \cdot (2 \cdot r_{sil} - w_{seg}) \right)^{0,5} = 2 \cdot \left( 0,03 \cdot (2 \cdot 0,145 - 0,03) \right)^{0,5} = 0,1766 m, \quad (2.4.11)$$

kus  $l_{kõõl}$  on veepinna ühe külje pikkus, m;

$w_{seg}$  – segmendi kõrgus, ehk veepinna kaugus anuma laest, 0,03 m;

$r_{sil}$  – anuma siseraadius, 0,145 m.

Nüüd on võimalik arvutada veepinna pindala:

$$A_{vp} = l_{kõõl} \cdot l_{pikkus} = 0,1766 \cdot 1,895 = 0,335 m^2, \quad (2.4.12)$$

kus  $A_{vp}$  on veepinna pindala, m<sup>2</sup>;

$l_{pikkus}$  – anuma sisepikkus, ehk veepinna teise külje pikkus, 1,895 m.

Enne massi ülekande arvutamist veepinnal tuleks arvutada CO<sub>2</sub> kontsentratsioon veepinnal:

$$\rho_{1b} = \frac{\phi_{veepind} \cdot M_{CO_2}}{V_{mol}} = \frac{0,142 \cdot 44,01}{24} = 0,26 \text{ kg/m}^3, \quad (2.4.13)$$

kus  $\rho_{1b}$  on CO<sub>2</sub> kontsentratsioon veepinnal, 0,26 kg/m<sup>3</sup>.

Teades veepinna pindala on võimalik leida massi ülekanne läbi selle veepinna [23]:

$$m_{yl2} = \frac{D_{ab} \cdot A_p \cdot (\rho_{1b} - \rho_2)}{h_{pr}} = \frac{2 \cdot 10^{-9} \cdot 0,335 \cdot (0,26 - 0)}{0,0001} = 1,74 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s} = 6,27 \text{ g/h}, \quad (2.4.14)$$

kus  $m_{yl2}$  on CO<sub>2</sub> massiülekanne veepinnast mikrovetikate suspensiooni, g/h;

$h_{pr}$  – mikrovetikate suspensiooni piirpind, 0,0001 m.

Arvutatakse CO<sub>2</sub> kogu massi ülekanne:

$$m_{sm} = m_{yl1} + m_{yl2} = 0,36 + 6,63 = 7 \text{ g/h}, \quad (2.4.15)$$

kus  $m_{sm}$  on kogu süsihappegaasi massi ülekanne ühes anum, g/h.

Leitud massi ülekande väärtus ei arvesta veepinna pindala suurenemist mullide tõttu ja anumal olevate labade segamise efekti. Järeldada võib seda, et CO<sub>2</sub> massi ülekanne on veepinnalt suurem kui massi ülekanne, mis toimub mullidest mikrovetikate suspensiooni, kuigi mullide teke on vajalik selle tõttu, et kasvukeskkond muutuks suuremaks ja pinna muutus oleks turbulentssem. Antud arvutuste juures pole arvestatud ka seda, et mulli trajektoor pole sirgjooneline ja mullide kuju pole kerakujuline, kui mullid liituvad. Kui aga gaasivoolu suurendada, siis kõige rohkem suureneb ainult esimene massi ülekanne (ehk mullist vette), sest teine massi ülekanne suureneb protsentuaalselt suhteliselt vähe, kuna veepinna pindala jääb samasse suurusjärku. Liigse gaasivoolu suurenemisega kaasneb aga oht, et see võib lõhkuda mikrovetikate rakuseinasid. Näiteks võiks teoreetiliselt kasutada gaasivoolu, kus CO<sub>2</sub> massi difusioon oleks võrdväärne vetikate poolt tarbitava CO<sub>2</sub> hulgaga:

$$Q_{id} = \frac{(m_{vet} - m_{yl2}) \cdot Q_{anum}}{m_{yl1}} = \frac{(71,7 - 6,63) \cdot 0,024}{0,36} = 4,34 \text{ m}^3/\text{h}, \quad (2.4.16)$$

kus  $Q_{id}$  on teoreetiline maksimaalne gaasivool, 4,34 m<sup>3</sup>/h.

Antud arvutusega saame järeldada, et bioreaktor oli konstrueeritud mitte optimaalselt, kuna CO<sub>2</sub> täieliku sidumise eesmärgil peaks läbi laskma gaasi nii palju, et see on turbulentsuse tõttu mikrovetikatele kahjulik.

Selleks, et teada saada, kui suur osa CO<sub>2</sub>-st läbib mikrovetikate suspensioonist reaalses gaasivoolus, tuleb arvutada CO<sub>2</sub> mass gaasivoolus ja antud vedeliku ruumalal olevate

mikrovetikate CO<sub>2</sub> tarbimine. Esiteks arvutatakse CO<sub>2</sub> kogus gaasivoolus, mis läbib ühte anumad:

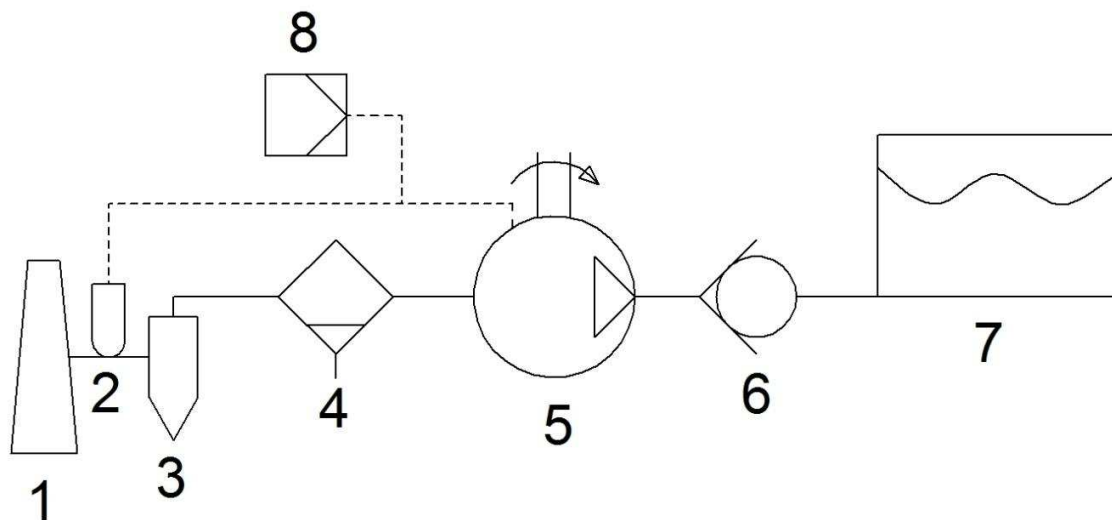
$$m_{rco2} = \frac{Q \cdot M_{co2} \cdot 15\%}{V_{mol}} = \frac{750 \cdot 44,01 \cdot 0,15}{24} = 206,25 \text{ g/h}, \quad (2.4.17)$$

kus  $m_{rco2}$  on CO<sub>2</sub> kogus reaalse gaasivoolu juures, mis läbib ühte anumad,  $g/h$ .

On näidatud, et *Chlorella* suudab tarbida CO<sub>2</sub>ühes liitris päeva kohta 17,2 grammi [16], ehk siis 71,67 grammi tunnis reaktori kohta, mis on sada liitrit. Ideaalse sidumise korral antud gaasivoolu juures suudavad mikrovetikad tarbida  $71,67 \cdot 100\% / 206,25 = 34,75\%$  süsihappegaasist, mis läbib ühte anumad. Sellise gaasivoolu juures oleks suur oht, et süsihappegaas hakkab pärssima mikrovetikate kasvu. Optimaalselt võiks siis gaasivool olla  $750 \cdot 0,3475 = 261 \text{ l/h} = 0,26 \text{ m}^3/\text{h}$ , kuid see kehtib ainult siis, kui fotobioreaktor oleks ideaalse konstruktsiooniga, kus süsihappegaas absorbeerub täielikult mikrovetikate suspensiooni.

## 2.5. Siirdesüsteemi tehnilise lahenduse kokkuvõte

Projekteeritava süsteemi skeem on esitatud Joonisel 2.6, kus on näidatud kõikide komponentide asetus teineteise suhtes:



**Joonis 2.6.** Siirdesüsteemi illustratiivne skeem. (1) Korsten; (2) Hapnikuandur; (3) Tsüklon; (4) Vee-eraldaja; (5) Õhupump; (6) Tagasivooluklapp; (7) Fotobioreaktor; (8) Kontroller.

Järgnevalt kirjeldatakse skeemil olevate komponentide tööpõhimõtet korstnagaasi liikumise baasil. Korstnagaasi liigub korstnast tsüklonisse, mis on 3 meetri kaugusel, kus temperatuur langeb 200-lt kraadilt 50 °C kraadini. Korstna ja tsükloni vahel on hapnikuandur, mis mõõdab hapniku kogust ja selle kaudu saab teada süsihappegaasi koguse. Gaasist eralduvad tsüklonis tahked osakesed ja sealt liigub gaas vee-eraldaja suunas, mis on 3,5 meetri kaugusel tsüklonist. Temperatuur langeb sellel kaugusel teoreetiliselt 29 kraadini, kui mitte arvestada vahepealset tsükloni asetust. Tõenäoliselt langeb temperatuur 25 °C kraadini, kui arvestada tsüklonit (kui gaas teeb vähemalt neli täisringi tsüklonis sees). Selleks ajaks kondenseerub gaasist enamuse vett ja vee-eraldaja suudab enamuse kondenseerunud veest ka eemaldada. Pool meetrit pärast vee-eraldajat on õhupump, mida kontrollib automaatselt hapnikuanduritega ühendatud kontroller. Kontroller reguleerib õhupumba tööd nii manuaalselt kui ka lähtuvalt hapnikuandurite mõõdetavatest hapniku piirväärtustest. Tagasivooluklapp paikneb enne fotobioreaktorit, mis hoiab ära vee tungimist torudesse. Tagasivooluklapp on siiski lisavarustus, sest torud paiknevad fotobioreaktorist kõrgemal.

## KOKKUVÕTE

Töö eesmärgiks oli konstrueerida siirdesüsteem, mis viiks korstnagaasi fotobioreaktorisse, kus korstnagaasis leiduv CO<sub>2</sub> seotakse mikrovetikate biomassi. Arvutuste baasil olid defineeritud siirdesüsteemi komponendid ja nende asukohad. Magistritöös oli kirjanduse ülevaates ka kirjeldatud biokütuste liike, mikrovetikate kasvatuse viise, korstnagaasi koostist ja korstnagaasis leiduva CO<sub>2</sub> mõju mikrovetikatele. Projekteeritud siirdesüsteem tagab minimaalsete komponentidega korstnagaasist tuleva CO<sub>2</sub> sidumise fotobioreaktoris olevasse biomassi, kuigi töö käigus on välja selgitatud, et antud fotobioreaktori konstruktsioon ei ole CO<sub>2</sub> täielikuks sidumiseks piisavalt efektiivne.

Sellest tulenevalt tehakse tulevikus doktoriõppes uuringuid erinevate fotobioreaktorite konstruktsioonide valdkonnas, mis võimaldaks siduda CO<sub>2</sub> biomassi efektiivsemalt, samal ajal vähendades jooksvaid kulusid. Siirdesüsteemi ja fotobioreaktori efektiivsust saaks tõsta järgmiselt:

1. Tuua fotobioreaktor ligemale korstnale. See vähendaks õhupumba vajalikku võimsust, kuigi mitte palju. Kõige rohkem mõjutab vajalikku võimsust veesamba kõrgus.
2. Konstrueerida selline fotobioreaktor, kus veesamba kõrgus oleks kõrgemal ja seetõttu oleks CO<sub>2</sub> sidumine ka efektiivsem.

## **SUMMARY**

The aim of the study was to design a transition system, which would transport flue gas into photobioreactor, where carbon dioxide from flue gas would be absorbed into microalgae. Components of that system and their respective locations were defined based on calculations. In literature review we described types of biofuels, ways to grow microalgae, composition of flue gas, its influence on microalgae and suitable microalgae for biofuel production and flue gas sequestration.

Designed transition system ensures sequestration of carbon dioxide into microalgae with minimal components, though we found out that the design of photobioreactor itself is not effective enough for full carbon dioxide sequestration.

Further studies will be done on photobioreactor designs in doctorate study, where photobioreactor should sequester carbon dioxide more effectively while lowering the running costs of those photobioreactors. The effectiveness of the transition system and a photobioreactor can be increased:

1. By bringing photobioreactor closer to the source of flue gas creation, though this would decrease the needed power of the air (gas) pump only marginally. The biggest effect of needed power is the height of the water column.

2. By constructing such a photobioreactor, where water column is much higher than the current photobioreactor, thus increasing the effectiveness of the sequestration of the carbon dioxide.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. **A Review. N. Gaurav , S. Sivasankari, G. Kiran , A. Ninawe , J. Selvin.** (2016). Utilization of bioresources for sustainable biofuels – Renewable and Sustainable Energy Reviews 73. lk 205–214.
2. **Joseph G. Allen, Piers MacNaughton, Usha Satish, Suresh Santanam, Jose Vallarino, John D. Spengler.** (2016). Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments. - Environmental Health Perspectives. lk 805-812.
3. Biofuel. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Biofuel> (25.05.2017)
4. Handbook of biofuels production – Processes and technologies. (2011) /Koost. Rafael Luque, Juan Campelo, James Clark. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 15. 659 lk.
5. Renewables 2015: Global Status Report (2015). [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015\\_Onlinebook\\_low1.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf) (25.05.2017).
6. **Ambreen Aslam, Skye Thomas-Hall, Tahira Aziz Mughal, Peer M. Schenk.** Selection and adaptation of microalgae to growth in 100% unfiltered coal-fired flue gas. (2017). – Bioresource Technology 233. lk 271–283.
7. **Roman A. Voloshin a, Margarita V. Rodionova, Sergey K. Zharmukhamedov, T. Nejat Veziroglu, Suleyman I. Allakhverdiev.** Review: Biofuel production from plant and algal biomass. (2016). – International Journal of Hydrogen Energy 41. lk 17257-17273.
8. Oil yields, characteristics. [http://journeytoforever.org/biodiesel\\_yield.html](http://journeytoforever.org/biodiesel_yield.html) (25.05.2017).
9. **Barnabas Gikonyo.** Advances In Biofuel Production: Algae and Aquatic Plants. (2014). Apple Academic Press. 362 lk.
10. Algaculture. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Algaculture> (26.05.2017).

11. Algae cultivation systems.  
[http://www.powerplantccs.com/ccs/cap/fut/alg/algae\\_cultivation\\_systems.html](http://www.powerplantccs.com/ccs/cap/fut/alg/algae_cultivation_systems.html)  
(26.05.2017).
12. **Wai Yan Cheah, Pau Loke Show, Jo-Shu Chang, Tau Chuan Ling, Joon Ching Juan.** (2015). Biosequestration of atmospheric CO<sub>2</sub> and flue gas-containing CO<sub>2</sub> by microalgae. – *Bioresource Technology* 184. lk 190–201.
13. **Kanhaiya Kumar, Debopam Banerjee, Debabrata Das.** (2013). Carbon dioxide sequestration from industrial flue gas by *Chlorella sorokiniana*. – *Bioresource Technology* 152. lk 225–233.
14. **Morten Tony Hansen, Anna Rosentoft Jein.** English handbook for wood pellet combustion. (2009).
15. Flue gas analysis in fuel industry.  
[http://www.testo350.com/downloads/Flue\\_Gas\\_in\\_Industry\\_0981\\_2773.pdf](http://www.testo350.com/downloads/Flue_Gas_in_Industry_0981_2773.pdf)  
(22.05.2017)
16. **Sheng-Yi Chiu, Chien-Ya Kao, Chiun-Hsun Chen, Tang-Ching Kuan, Seow-Chin Ong, Chih-Sheng Lin.** (2008). Reduction of CO<sub>2</sub> by a high-density culture of *Chlorella* sp. in a semicontinuous photobioreactor. – *Bioresource Technology* 99 . lk 3389–3396.
17. **Mohd Asyraf Kassim, Tan Keang Meng.** (2017). Carbon dioxide (CO<sub>2</sub> ) biofixation by microalgae and its potential for biorefinery and biofuel production. – *Science of the Total Environment* 584–585. lk 1121–1129.
18. Minimum particle size for cyclone dust collector. (2011)  
<http://www.maths-in-industry.org/miis/328/1/minimum-particle-size-for-cyclone-dust-separator.pdf>  
(11.05.2017).
19. **Tran Phong.** Cyclonic vacuum cleaner with improved collection chamber. (2016).  
[https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=2016367098A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20161222&DB=EPODOC&locale=en\\_EP#](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=2016367098A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20161222&DB=EPODOC&locale=en_EP#) (26.05.2017).
20. **Hirata Yuichiro, Toyoshima Toshihiro, Osumi Yoko, Izumida Maasa.**(2016). Electric dust collector of cyclone separator.  
[https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=2016367098A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20161222&DB=EPODOC&locale=en\\_EP#](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=2016367098A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20161222&DB=EPODOC&locale=en_EP#)



- [R=2016375447A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20161229&DB=EPODOC&locale=en\\_EP#](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=2016206169A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20161229&DB=EPODOC&locale=en_EP#) (25.05.2017).
21. **Hyun Kietak, Lee Seungyeop, Ahn Hyukjin.**Dust collector for vacuum cleaner.(2016).[https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=2016206169A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20160721&DB=EPODOC&locale=en\\_EP#](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=2016206169A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20160721&DB=EPODOC&locale=en_EP#) (25.05.2017).
  22. **Yuhei Kosaki, Takayuki Hirai, Yoshinari Yamanaka, Keishi Takeshima.**(2015). Investigation on dust collection and particle classification performance of cyclones by airflow control for design of cyclones. – Powder Technology 277. lk 22–35.
  23. **Yunus cengel, Afshin Ghajar.**(2015). Heat and mass transfer, fifth edition. 968 lk.
  24. **Leo Tepaks.**(1967). Hüdraulika. Tallinn: Valgus. 421 lk.
  25. Hapnikuandur. Vikipeedia. <https://et.wikipedia.org/wiki/Hapnikuandur> (27.07.2017).
  26. **Moein Siadaty, Saeid Kheradmand, Fatemeh Ghadiri.**(2017). Study if inlet temperature effect on single and double inlets cyclone performance. – Advanced Powder Technology.
  27. **Michael K. Stenstrom.**Motion of Bubbles and bubble characteristics. <http://www.seas.ucla.edu/stenstro/Bubble.pdf>(02.04.2017).
  28. Surface Tension. Wikipedia.[https://en.wikipedia.org/wiki/Surface\\_tension](https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_tension) (24.05.2017).
  29. Terminal velocity. Wikipedia.[https://en.wikipedia.org/wiki/Terminal\\_velocity](https://en.wikipedia.org/wiki/Terminal_velocity) (23.05.2017).
  30. Mehaanikainseneri Käsiraamat. (2015). Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus. 492 lk.

## **LISAD**