

YMPÄRISTÖNSUOJELUN
BIOPROSESSIEN MALLINTAMINEN
LABORATORIOMITTAKAAVASSA

Mallinnusreaktoreiden suunnittelu, toteutus ja testaus

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
Ympäristötekniikan opintosuunta
Opinnäytetyö
Kevät 2007
Rauno Leván

Kiitokset

Haluan kiittää ohjaavaa opettajaani Silja Kostiaa Lahden ammattikorkeakoulusta, joka toimi samalla työn ammatillisena ohjaajana. Kiitokset myös Helsingin yliopiston Ympäristöekologian laitoksen Martin Romantschukille, Sonja Sunille, Jukka Kurolalle ja Tuukka Ryynäselle yhteistyöstä ja avusta reaktoreiden suunnittelussa. Lisäksi haluan kiittää teknisestä avusta ja yhteistyöstä Mervi Pulkista, Reijo Heikkistä, Markus Halmetta, Esa Auvista, Kristian Rintalaa, Jari Kukkosta ja Jorma Sillmania Lahden ammattikorkeakoulusta sekä Pentti Järvelää ja muita projektiin osallistuneita henkilöitä ja yrityksiä.

Erityiset kiitokset myös Essi Maliselle ja Johanna Rikkiselle sekä testaukseen osallistuneille Lahden ammattikorkeakoulun ympäristötekniikan opiskelijoille, joiden osallistumisen ja kiinnostuksen ansiosta voitiin tällainen projekti järjestää. Lopuksi kiitokset vielä Lahden ammattikorkeakoululle mielenkiintoisesta opin- näytetyön aiheesta ja tuesta työn eri vaiheissa.

Lahden ammattikorkeakoulu
Tekniikan laitos
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

LEVÁN, RAUNO: Ympäristönsuojelun bioprosessien mallintaminen laboratoriomittakaavassa
Mallinnusreaktoreiden suunnittelu, toteutus ja testaus

Ympäristötekniikan opinnäytetyö, 66 sivua, 3 liitesivua

Kevät 2007

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tarkoituksena oli valmistaa uudet bioreaktorit Lahden ammattikorkeakoulun ja Helsingin Yliopiston ympäristöekologian laitoksen opetus- ja tutkimuskäyttöön. Vanhojen reaktoreiden käytössä havaitut ongelmat ja rajoitukset toimivat tutkimuksen ja uusien reaktoreiden suunnittelutyön taustana.

Työ oli osana T&K –ideat käytäntöön -hanketta, jonka rahoittajana toimivat Päijät-Hämeen liitto, Lahden ammattikorkeakoulu ja Lahden kaupunki sekä Helsingin Yliopisto ja alueen yritykset.

Suunnittelutyö tehtiin kesällä 2006, jonka perusteella syksyllä valmistui kaksitoista kooreaktoria. Suunnittelussa painotettiin reaktoreiden monipuolisuutta, kestävyyttä ja helppokäyttöisyyttä. Myös erilaisten mittaus- ja oheislaitteiden käyttöä ja yhteensopivuutta pohdittiin suunnittelun aikana. Tarkoituksena oli, että reaktoreilla voitaisiin mallintaa ja seurata erilaisia ympäristönsuojelun bioprosesseja, kuten kompostointia, jäteveden käsittelyä, biosuodatusta sekä erilaisia maaperän biologisia puhdistusmenetelmiä.

Valmiita bioreaktoreita testattiin kolmella eri tavalla, joista kaksi tapahtui osana Lahden ammattikorkeakoulun opintojaksoja. Testauksien yhteydessä koottiin havaintoja reaktoreiden sekä oheis- ja mittalaitteiden toiminnasta sekä saatiin käytännön kokemuksia reaktoreiden soveltumisesta Lahden ammattikorkeakoulun opetuskäyttöön. Lisäksi opintojaksoille osallistuneilta opiskelijoilta kerättiin palautetta ja mielipiteitä reaktoreista ja niiden käytöstä opetuksen apuvälineenä.

Suunnittelu-, toteutus- ja testausvaihe on raportoitu tähän opinnäytetyöhön. Tarkoituksena on, että tämä kirjallinen työ toimii käytännön ohjeena ja esimerkkinä siitä, kuinka ympäristöbioprosessien laboratoriomittakaavan mallinnusta voidaan kehittää ja käyttää osana käytännön opetus- ja tutkimustyötä.

Avainsanat: bioprosessi, reaktori, mallinnus

Lahti University of Applied Sciences
Faculty of Technology
Degree Program of Environmental Technology

LEVÁN, RAUNO: Modelling of environmental bioprocess in laboratory scale
Design, preparation and testing of pilot reactors

Bachelors' Thesis in Environmental Technology, 66 pages, 3 appendices

Spring 2007

ABSTRACT

The objective of this study was to manufacture new laboratory scale bioreactors for the use of Lahti University of Applied Sciences and for Helsinki University, Faculty of Environmental Ecology. The purpose was to utilize these new reactors mainly in education, but also in different research projects. The problems and limitations with the use of old reactors served as a background for this study.

This study was part of a project "R&D – ideas to practice", which was funded by Päijät-Häme Union, Lahti University of Applied Sciences, Helsinki University of Environmental Ecology and Lahti City as well as some local companies.

Twelve pilot reactors were built on the grounds of practical design work that took place in the summer of 2006. In designing of these reactors, our team emphasised versatility, durability and the ease of use. Also the usage of different kinds of measurement and peripheral devices with the reactors was considered. Pilot reactors were built to model various environmental bioprocesses such as composting, wastewater treatment, bio-filtering and also different kinds of biological cleansing processes of contaminated soil.

Pilot reactors were tested as a part of two different study modules in Lahti University of Applied Sciences. Observations were made of how the reactors functioned in practice and how different kinds of measurement and peripheral devices work with the reactors. Practical experience was gained from the use of pilot reactors and from applying them to educational purposes. Feedback and some development ideas concerning reactors and their usage as a tool in environmental education was also gathered from the students that participated in these study modules.

Design, preparation and testing phases are reported in this thesis. This report serves as an example of how to use and develop this kind of pilot modelling in a laboratory scale as part of practical education and research work.

Keywords: bioprocess, pilot reactor, modelling

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	BIOPROSESSITEKNIikka	2
	2.1 Bioprosessit	2
	2.2 Bioreaktorityypit	4
	2.3 Bioreaktorin instrumentointi	8
	2.3.1 Yleistä prosessimittauksista	8
	2.3.2 Kemialliset mittaukset	9
	2.3.3 Fysikaaliset mittaukset	10
	2.3.4 Biologiset mittaukset	11
3	SUUNNITTELUtyö	12
	3.1 Työryhmä	12
	3.2 Lähtötilanne	12
	3.3 Ongelmat	14
	3.4 Toiveita ja kehitysehdotuksia	16
	3.5 Mallinnettavia bioprosesseja	17
	3.5.1 Prosessien vaatimukset	17
	3.5.2 Komposti	18
	3.5.3 Maaperän puhdistus	19
	3.5.4 Jäteveden käsittely	19
	3.5.5 Biosuodatus	20
4	KOEREAKTORI	21
	4.1 Runko	21
	4.2 Kansi	25
	4.3 Läpiviennit	26
	4.4 Välipohja	27

5	OHEIS- JA MITTALAITTEET	29
5.1	Pumput	29
5.2	Putket	31
5.3	Sintterit	32
5.4	Venttiilit	33
5.5	Kaasukromatografi	34
5.6	pH-mittari	35
5.7	Lämpötilan mittaus	36
6	KUSTANNUSARVIO	38
7	TESTAUS 1: KOMPOSTIKOE	39
7.1	Toteutus ja tarkoitus	39
7.2	Koejärjestelyt	39
7.3	Havainnot järjestelmän toiminnasta	42
7.4	Palaute	45
7.4.1	Palautteen kerääminen	45
7.4.2	Ajankäyttö ja menetelmät	45
7.4.3	Käytännön suoritus ja soveltaminen	47
7.4.4	Kehitysehdotukset ja muu palaute	48
7.5	Suoritettut mittaukset ja analyysit	49
7.5.1	Tuloksista yleisesti	49
7.5.2	Reaktoreista mitatut parametrit	49
7.5.3	Laboratorioanalyysit	51
7.6	Yhteenvedo	52
8	TESTAUS 2: TIIVEYSKOE	53
8.1	Toteutus	53
8.2	Tulokset ja havainnot	53
8.3	Johtopäätökset	54

9	TESTAUS 3: MAAMASSAN PUHDISTUS	55
9.1	Toteutus ja tarkoitus	55
9.2	Koejärjestelyt	55
9.3	Havainnot	59
8.4	Palaute ja tulokset	60
9.5	Päätelmät	61
10	HANKKEEN YHTEENVETO	62
10.1	Jatkotoimenpiteitä ja kehitysehdotuksia	62
10.2	Hankkeen lopputulokset	63
	LÄHTEET	65

1 JOHDANTO

Bio- ja ympäristötekniset prosessit, kuten jäteveden puhdistus, kompostointi ja erilaiset maaperän puhdistusmenetelmät, kuuluvat ympäristötekniikan insinöörin perusopintoihin ja niiden toimintaa käydään läpi useilla opintojaksoilla. Lisäksi useat koulutusohjelmasta valmistuvat opiskelijat tekevät prosesseihin liittyvät opinnäytetyöt.

Keväällä 2006 Lahden ammattikorkeakoulussa valmistui kaksi opinnäytetyötä, joissa molemmissa oli tehty pilaantuneen maaperän biologisen puhdistusprosessin laboriomallinnus. Mallinnukseen oli käytetty Helsingin Yliopiston ympäristöekologian laitoksen välineistöä. Muun muassa näissä kokeissa saatujen käyttökokemusten perusteella koettiin tarpeelliseksi kehittää mallinnusvälineistöä, jotta sitä voitaisiin jatkossa hyödyntää tehokkaammin Lahden ammattikorkeakoulun ja Helsingin Yliopiston ympäristöekologian laitoksen opetus- ja tutkimuskäytössä.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella, valmistaa ja testata bioreaktorit, joilla voitaisiin monipuolisesti ja havainnollisesti toteuttaa erilaisia ympäristöbioteknisiä prosesseja laboriomittakaavassa. Tämän raportin tarkoituksena on esitellä hankkeen lähtökohdat ja työn tuloksena syntyneet reaktorit. Reaktorien ja oheislaitteiden esittely sekä testaus antavat lähtökohtia järjestelmän jatkokäyttöä ja -kehitystä varten.

Hanke toteutettiin T&K:n ideat käytäntöön –projektin osana vuonna 2006 yhteistyössä Lahden ammattikorkeakoulun ja Helsingin Yliopiston ympäristöekologian laitoksen kanssa. Rahoituksesta vastasivat myös Päijät-Hämeen liitto, Lahden kaupunki sekä alueen yritykset. Työn ohjaajana toimi Silja Kostia Lahden ammattikorkeakoulusta. Valmiita reaktoreita testattiin kahdella ympäristötekniikan opintojaksolla syksyllä 2006 ja talvella 2007.

2 BIOPROSESSITEKNIikka

2.1 Bioprosessit

Ihminen on hyödyntänyt ympäristössä tapahtuvia bioprosesseja hyvin pitkään. Käymistä hyödynnettiin erilaisten tuotteiden valmistuksessa jo kauan ennen kuin ymmärrettiin miten kyseinen prosessi biologisesti toimii. Tekniikan kehitys on mahdollistanut useiden muidenkin biologisten prosessien valjastamisen ihmisen hyödyksi. (Williams 2002.)

Erilaisten bioprosessien luokittelu on tärkeä osa prosessin hallintaa ja toimii apuvälineenä oikeiden prosessityyppien valinnassa ja mitoituksessa. Grady & Lim (1980) luokittelivat biologisia prosesseja kolmen eri näkökulman mukaan: biokeemiallisen ympäristön, joka voidaan jakaa karkeasti aerobiseen ja anaerobiseen; prosessityypin, joka voi olla orgaanisen materiaalin poistoa, stabilointia tai muokkausta sekä reaktortyyppin, joka vaikuttaa merkittävästi prosessin toimintaan.

Nykyisin käytössä olevia biologisia prosesseja voidaan jakaa myös puhdistus- ja tuotantoprosesseiksi. Puhdistusprosessien käyttökohteita ovat esimerkiksi kompostointi, mädätys sekä jäteveden puhdistus sekä uudempina käyttökohteina esimerkiksi kaasujen ja maaperän biologinen puhdistus. Tällöin yleisesti puhutaan myös ympäristöbioteknisistä prosesseista.

Tuotantoprosesseilla valmistetaan erilaisia bioteknisiä tuotteita. Ne voidaan jakaa kolmeen luokkaan, joista osassa tuote syntyy solujen aineenvaihdunnan tuloksena (alkoholit, entsyymit) joko primäärisenä tai sekundaarisena tuotteena. Toisilla prosesseilla tuotetaan taas biomassaa (hiiva) tai muokataan yhdisteitä (antibiootit, steroidit). (Williams 2002.)

Bioteknisten prosessien hallinta tapahtuu useiden erilaisten parametrien kautta. Näitä parametreja säätelemällä voidaan prosessia optimoida tai kuljettaa haluttuun suuntaan. Yleisimmät bioprosesseihin vaikuttavat tekijät ovat ravinto, happi, lämpötila ja pH. (Riet 1991.)

Useat biotekniset prosessit tapahtuvat yhden tuotanto-organismin avulla, jolloin olosuhteet pyritään pitämään optimaalisina halutulle organismille. Biotekniset tuotantoprosessit, kuten oluen valmistus, ovat nykyään erittäin hallittuja prosesseja, joissa haasteet kohdistuvatkin lähinnä prosessin tehostamiseen ja uusien käyttökohteiden löytämiseen.

Ympäristöbiotekninen prosessi sen sijaan perustuu sekapopulaatioihin heterogeenisessä ympäristössä, jolloin olosuhteiden yksinkertainen optimointi ei ole mahdollista tai välttämättä edes toivottavaa. Näiden prosessien haasteet piilevätkin vielä prosessin hallinnassa, kuten eri mikrobien vuorovaikutuksen ymmärtämisessä ja prosessissa tapahtuvan lajiston muuttumisessa.

Ympäristöbioteknisiä prosesseja pyritään ymmärtämään eri kokoluokan mallinusten avulla. Tällöin voidaan tutkia eri muuttujien vaikutusta prosessiin kontrolloiduissa olosuhteissa. Suuntaa-antavia tuloksia saadaan pienen mittakaavan laboratoriomallinuksilla käyttämällä esimerkiksi erilaisia bioreaktoreita. Laboratoriossa toteutettuja prosesseja voidaan soveltaa kentällä suuremmissa mittakaavoissa.

Bioreaktoreiden käyttöä Suomessa on tutkittu Jukka Sajamon insinööriyössä, jonka perusteella voidaan päätellä, että Suomessa valtaosa käytössä olevista bioreaktoreista toimii tuotantosektorilla joko tuotteen valmistus- tai tutkimusvaiheessa. Lähes kaikki käytettävät reaktorit voidaan mieltää fermentoreiksi, joka ei suinkaan ole ainoa bioreaktorin käyttötapa.

Ympäristöbioprosesseja mallinnettaessa reaktoreille asetettavat vaatimukset eroavat merkittävästi tuotannollisista reaktoreista, joka myös luo erilaiset lähtökohdat bioreaktoreiden suunnittelulle. Seuraavassa kappaleessa on perehdytty tarkemmin bioreaktoreihin ja niiden käyttöön ympäristöbioprosessien näkökulmasta.

2.2 Bioreaktoryypit

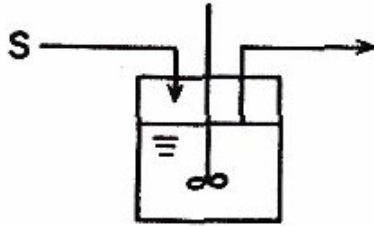
Valtaosa bioprosesseista toteutetaan jonkinlaisessa reaktorissa. Periaatteessa bio-reaktori toimii samalla tavoin kuin kemiallinen reaktori, mutta sen sisällä tapahtuva toiminta on yleensä monimutkaisempaa ja herkempää kuin perinteisissä kemiallisissa reaktoreissa. Reaktoryypin valinta vaikuttaa olennaisesti prosessin toimintaan ja tehokkuuteen. (Aittomäki ym. 2002.)

Bioreaktoreita voidaan luokitella sekoitustavan mukaan, joista mekaaninen ja ilmastuksen avulla tapahtuva sekoitus ovat yleisimpiä (Riet 1991). Ilmanostereaktorit toimivat samalla periaatteella ilmastusekoitusreaktoreiden kanssa, mutta niissä ylös virtaava ilma on erotettu alhaalle kulkevasta ilmasta. Tällöin saadaan aikaiseksi suurempia virtauksia ja voimakkaampaa sekoitusta. Ilmastusekoituksella toimivat reaktorit ovat leveys-korkeus –suhteeltaan suurempia kuin mekaaniseen sekoitukseen perustuvat reaktorit. Tämä johtuu yksinkertaisesti siitä, että samalla ilmamäärällä saadaan tornimaisessa reaktorissa enemmän sekoitusta aikaan samalla siirtäen enemmän happea ilmakuplista liuokseen. (Aittomäki ym. 2002.)

Mekaanisia sekoitusreaktoreita käytetään, kun sekoitettavan aineen viskositeetti ei nouse kovin korkeaksi tai reaktoreiden tilavuus pysyy suhteellisen pienenä. Suurilla tilavuuksilla mekaaninen sekoitus kuluttaisi niin paljon energiaa, että sen sijaan käytetään ilmastus- tai ilmanostesekoitusta. Ne eivät kuitenkaan sovellu kovin viskoosille nesteille, koska tällöin ilmakuplien sekoitusteho ei riitä. Perussääntönä voidaan todeta, että alle 200 m³ reaktorit toimivat mekaanisella sekoituksella ja sitä suuremmat ilmastus- tai ilmanostesekoituksella. (Riet 1991.)

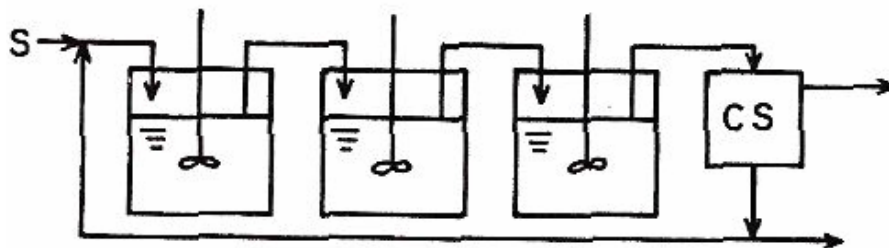
Seuraavaksi on esitelty tarkemmin Grady ja Limin (1980) käsitys neljästä bioreaktorin perustyyppistä, jotka toimivat reaktorille ominaisella tavalla huolimatta siitä millaista biokemiallista toimintaa sen sisällä tapahtuu. Lisäksi pohditaan yleisesti näiden eri reaktoryyppien käyttöä ympäristönsuojelun bioprosessien mallintamisessa.

Yksinkertaisin **jatkuvatoiminen sekoitusreaktori** (Continuous-flow Stirred Tank Reactor) käsittää yhden reaktoriastian (Kuvio 1), jonka sisällä olevaa nestettä sekoitetaan jatkuvasti. Reaktoriin tuodaan ja sieltä poistuu virta, joka sisältää joko ravintoa tai lopputuotetta. Reaktorissa olevan nesteen tilavuus ja vallitsevat olosuhteet pysyvät tasaisina.



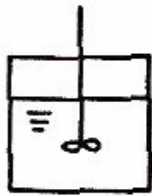
KUVIO 1. Sekoitusreaktori (Grady & Lim 1980)

Sekoitusreaktoriin voidaan kytkeä esimerkiksi toisia sekoitus- tai erotusreakteireita, jolloin yksinkertaiseen reaktoriin saadaan enemmän joustavuutta ja toimintamahdollisuuksia. Esimerkkeinä ovat perinteiset jäteveden käsittelyjärjestelmät, joissa on kytketty useita sekoitus- ja erotusreakteireita peräkkäin. Myös tulovirtoja voidaan tällöin ohjata useampiin reaktoreihin ja lopputuotetta voidaan palauttaa takaisin prosessiin. Useiden reaktoreiden sarjaan kytkeminen (Kuvio 2) mahdollistaa erilaiset olot ja reaktiot eri vaiheissa, jolloin voidaan toteuttaa monimutkaisempia prosesseja.



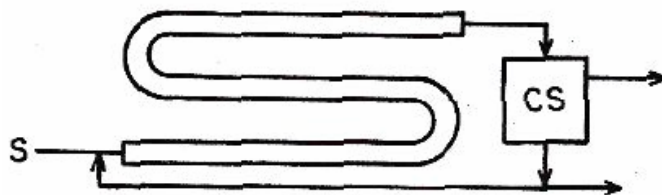
KUVIO 2. Sarjaan kytketyt sekoitusreaktorit (Grady & Lim 1980)

Nimensä mukaisesti **panosreaktorissa** (Batch Reactor, Kuvio 3) ei ole virtausta kuten jatkuvatoimisessa reaktorissa, vaan se käsittelee erän, panoksen, materiaalia kerrallaan. Toisin kuin jatkuvatoimisessa reaktorissa panosreaktorin prosessin olosuhteet muuttuvat prosessin edetessä. Prosessin valmistuttua reaktori tyhjätyään, ja sinne asetetaan uusi erä prosessointia varten. Kiinteän aineen puhdistuminen käy hitaammin kuin nesteen, ja sen liikuttaminen jatkuvatoimisen prosessin aikaansaamiseksi on kohtuuttoman hankalaa. Tällöin panosreaktori on luonnollinen valinta esimerkiksi ympäristöbioprosesseissa, kuten lietteen tai pilaantuneen maan aineksen käsittely.



KUVIO 3. Panosreaktori (Grady & Lim 1980)

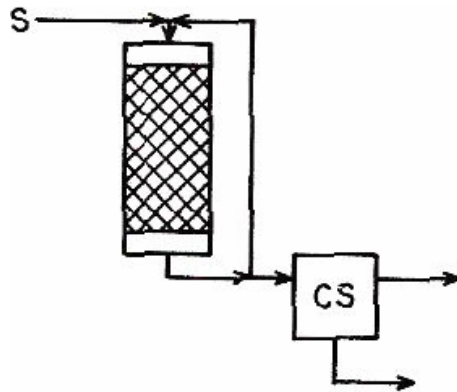
Tulppavirtausreaktori (Plug-flow Reactor, Kuvio 4) on periaatteessa panos- ja jatkuvatoimisen virtausreaktorin yhdistelmä, jossa panos virtaa reaktorin läpi. Reaktoriin yhdistetään hyvin usein palautusvirtaus, jolloin sama panos kulkee reaktorin läpi useita kertoja. Reaktorin eri osissa on erilaiset olosuhteet, mikä vaikuttaa panoksessa tapahtuvaan prosessiin. Tulppavirtausreaktorissa vallitsevatkin hallitut, tasaiset olosuhteet, jotka vaihtelevat tiettyjen ominaisuuksien, kuten esimerkiksi lämpötilan, ravinteiden tai pH:n osalta reaktorin eri osissa.



KUVIO 4. Tulppavirtausreaktori (Grady & Lim 1980)

Biofilmireaktoreita (Fixed Films) voivat olla esimerkiksi tornimaiset biosuodattimet (Kuvio 5) tai bioroottorit, joissa kiinteään aineeseen kiinnittyneet mikrobit ottavat ravintonsa ohi liikkuvasta aineesta, joka voi olla joko nestettä tai kaasua. Biosuodattimessa biofilmi on paikallaan ja ravinto virtaa sen lävitse. Bioroottoreissa nimensä mukaisesti roottorin lapoihin kiinnittynyt biofilmi liikkuu esimerkiksi nestefaasin läpi keräten siitä ravintoa. Biosuodattimien läpi kulkevaa nestettä tai ilmaa kierrätetään, jolloin reaktoriin saadaan luotua homogeeniset olosuhteet.

Biosuodatinreaktoreita on käytetty menestyksellä esimerkiksi pilaantuneen pohjaveden kunnostuksessa (Järvinen, K. 2001) ja niitä voidaan soveltaa esimerkiksi teollisuudessa kaasujen ja pienimääraisten, väkevien jätevesien puhdistukseen. Suuria määriä puhdistettaessa bioroottorit tai muun tyyppiset reaktorit ovat suodattimia käytännöllisempiä ratkaisuja.

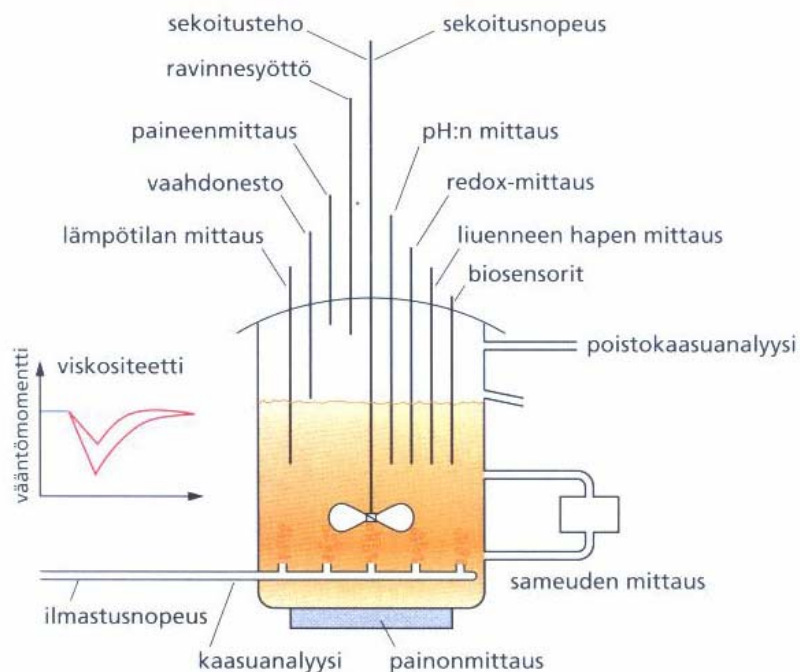


KUVIO 5. Biosuodin (Grady & Lim 1980)

2.3 Bioreaktorin instrumentointi

2.3.1 Yleistä prosessimittauksista

Erilaiset mittaukset ovat olennainen osa koulutus- ja tutkimuskäytössä olevissa bioreaktoreissa. Jokainen lisämittaus tuo lisää informaatiota, jota voidaan käyttää ratkaistaessa erilaisia tutkimus- ja tuotanto-ongelmia. Biologista toimintaa ei voida mitata suoraan, vaan sitä mitataan useiden muiden parametrien perusteella. Nämä mittaukset voidaan jakaa kemiallisiin, fysikaalisiin ja biologisiin mittauksiin, jotka voivat tapahtua online- tai offline-tilassa. Kuviossa 6 on esitetty yleisimpiä bioreaktorista tapahtuvia mittauksia, joista osa on esitelty tarkemmin seuraavissa kappaleissa. Lähteenä on käytetty BIOprosessitekniikka-kirjan mittaus, mallinnus ja säätö –lukua, jonka on koontanut ja kirjoittanut Tero Eerikäinen.



KUVIO 6. Bioreaktorin instrumentointi (Aittomäki ym. 2002)

2.3.2 Kemialliset mittaukset

Happamuuden, liuenneen hapen ja hapetus-pelkistyspotentiaalin määrittäminen ovat kemiallisista mittauksista yleisimmät. Myös esimerkiksi kaasujen pitoisuuksia voidaan määrittää kemiallisesti.

Happamuus on yksi tärkeimmistä ja eniten seuratuista bio- ja ympäristöprosesseihin vaikuttavista tekijöistä. Happamuuden, eli pH:n mittaaminen tapahtuu hyvin usein jatkuvatoimisesti, jolloin reaktoriin on sijoitettu pH-anturi, joka mittaa ja tallentaa reaktorissa tapahtuvia happamuuden muutoksia. Myös erilaisia pH-mittareita voidaan käyttää, jos jatkuvaa tietoa prosessin tilasta ei ole tarvetta tai mahdollista saada. Käytettävien kiinteiden antureiden tulee kestää reaktorin olosuhteet ja mahdolliset steriloinnit, mikä aiheuttaa vaatimuksia käytettävien elektrodien valinnalle.

Liuenneen happea tarkkaillaan esimerkiksi runsashappisessa jäteveden käsittelyprosessissa, kun on tärkeää valvoa prosessissa tapahtuvaa mikrobiston kasvua ja ilmastuksen tehoa. Mittaukset tapahtuvat pääasiassa polarografisten tai galvaanisten elektrodien avulla, jotka mittaavat hapen osapainetta nesteessä. Osapaineesta voidaan määrittää hapen absoluuttinen määrä, kun muut olosuhteet (lämpötila ja paine) ovat tunnettuja.

Hapetus-pelkistysmittausta, eli redox-mittausta käytetään anaerobisissa tai vähähappisissa oloissa, joissa liuenneen hapen mittaaminen ei onnistu tai ei anna oikeaa kuvaa prosessin tilasta. Redox-mittauksen tulos ilmoittaa reaktorissa olevan systeemin kokonaiskyvyn luovuttaa tai vastaanottaa elektroneja. Tulosten tulkinta on kuitenkin vaikeaa, joten mittaaminen täydentääkin usein muita tuloksia.

Kaasumaisia aineita mitataan usein reaktorin tulo- ja poistoilmasta. Tulokset antavat tietoa reaktorissa tapahtuvasta aineenvaihdunnasta. Mittauksia voidaan suorittaa esimerkiksi massaspektrometrin tai kaasukromatografian avulla, jolloin mitattavat aineet ovat yleensä haihtuvia. Happea ja hiilidioksidia voidaan mitata suoraan ilmasta erilaisten antureiden avulla ilman analyysilaitteita.

2.3.3 Fysikaaliset mittaukset

Fysikaaliset mittaukset, kuten esimerkiksi lämpötila, paine, virtaus, pinnankorkeus ja massa ovat yksinkertaisia mitata ja niillä on suuri vaikutus reaktorissa tapahtuvaan prosessiin. Lähes kaikkia fysikaalisia parametreja voidaan mitata jatkuva-toimisesti ja melko yksinkertaisin menetelmin, jolloin niiden perusteella on luonnollista suorittaa prosessinohjausta ja –sääntöä.

Lämpötilaa mitataan hyvin usein vastuslämpömittareilla, koska ne ovat tarkkoja ja stabiileja. Ne eivät reagoi kovin nopeasti lämpötilan muutoksiin, mutta se ei yleensä ole biologisissa prosesseissa välttämätöntä. Vastuslämpömittareissa lämpötilan muutos havaitaan anturin resistanssin muuttuessa. Lämpötilaa mitataan useissa prosesseissa, ja tämän vuoksi myös erilaisia mittausjärjestelmiä on laajalti ja melko edullisesti saatavilla.

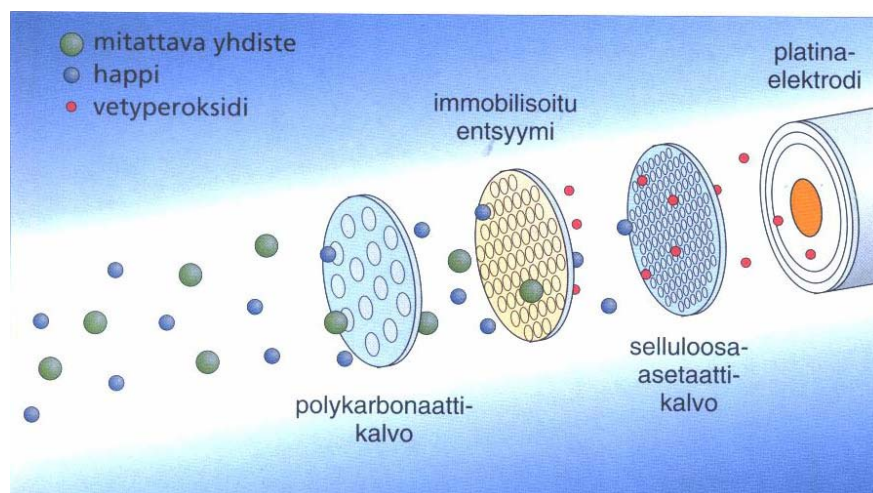
Painetta voidaan mitata useilla mekaanisilla ja sähköisillä menetelmillä. Paineen avulla voidaan laskea muita prosessille merkittäviä parametreja, kuten esimerkiksi eri kaasujen osapaineita ja pitoisuuksia. Useissa bioreaktoreissa on tärkeää pitää ylipainetta aseptisuuden varmistamiseksi, jolloin paineen tarkkailu on olennainen osa prosessin valvontaa.

Lähes kaikissa bioprosesseissa reaktoreihin syötetään ja sieltä poistetaan ainetta. Määriä valvotaan erilaisten virtausmittareiden avulla. Kuten painemittareita, myös virtausmittareita on sekä mekaanisia että sähköisiä. Virtausta voidaan seurata myös magneettisilla mittareilla tai epäsuorasti pumppausnopeuden, pinnankorkeuden tai reaktoreiden massan kautta. Yleisin virtausmittari on mekaaninen rotametri, jossa uimuri nousee putkessa ohi kulkevan virtauksen vaikutuksesta. Uimurin asema asteikkoon nähden ilmoittaa virtauksen voimakkuuden. Virtaamien seuranta on olennainen osa niin pienien kuin suurtenkin prosessien ohjausta.

2.3.4 Biologiset mittaukset

Biologiset mittausten menetelmät ovat fysikaaliskemiallisia mittauksia harvinaisempia, ja niitä käytetäänkin lähinnä laboratorio-olosuhteissa lukuisten teollisuuskäytössä ilmenevien käytännön ongelmien vuoksi.

Biologisia muuttujia mitataan yleisesti antureilla, joissa fysikaaliskemialliseen mittaukseen on yhdistetty jokin biologinen materiaali. Tällöin puhutaan biosensoreista, joita käytetään kuten perinteisiäkin antureita. Biosensoreissa jokin tunnettu anturin sisällä oleva biokatalyytti, esimerkiksi entsyymi tai antigeeni, muuttaa mitattavassa aineessa olevaa substraattia joksikin loppu- tai sivutuotteeksi. Tämän tuotteen määrää mittaa kemiallinen tai fysikaalinen anturi, joka voi perustua esimerkiksi lämmön, valon tai pH:n mittaamiseen. Kun biokatalyytti on valittu prosessin kannalta oikein ja sen toiminta vallitsevissa olosuhteissa on tunnettu, saadaan selville lähtöaineen pitoisuus reaktorissa. Esimerkiksi sokereita, aminohappoja ja alkoholeja voidaan määrittää erilaisten biosensoreiden avulla. Biosensorin toimintaa on selvitetty kuviossa 7.



KUVIO 6. Entsyymireaktioon perustuva biosensori (Aittomäki ym. 2002)

3 SUUNNITTELUTYÖ

3.1 Työryhmä

Suunnittelutyöhön osallistui lisäksi Silja Kostia Lahden ammattikorkeakoulusta ja Martin Romantschuk, Tuukka Ryyänen sekä Sonja Suni Helsingin Yliopiston ympäristöekologian laitokselta. Käyttökokemuksia ja palautetta mallinutusreaktoreista antoivat reaktoreita opinnäytetyössään käyttäneet Johanna Rikkinen ja Essi Malinen. Asiantuntija-apua antoivat Mervi Pulkkinen (GC-PID), Markus Halme (anturit, sähkötekniikka) sekä Reijo Heikkinen ja Esa Auvinen (runkomateriaalit, työstö) Lahden ammattikorkeakoulusta.

3.2 Lähtötilanne

Työn taustalla olleet opinnäytetyöt käsittelivät pilaantuneen maa-aineksen puhdistamista elektrokineettisesti. Molemmissa töissä suoritettiin laboratoriomittakaavan koe, jossa pyrittiin selvittämään puhdistusmenetelmän toimivuus kyseisessä tapauksessa. Koe suoritettiin Helsingin Yliopiston ympäristöekologian laitoksen tiloissa ja välineillä.

Koejärjestelyt olivat molemmissa kokeissa lähes samanlaiset. Bioreaktoreina toimivat noin 20 litran kylmälaukut (Kuvio 8), joihin rakennettiin elektrokineettinen puhdistusjärjestelmä. Kylmälaukkuihin sijoitettiin puhdistettavan massan ohella elektrodit ja pohjalle kvartsihiekkää sekä poistoletku, jonka tarkoituksena oli kerätä massan läpi suotautuva neste talteen. Poisto toimi joko passiivisena painovoiman avulla tai sitä tehostettiin pumpuilla. Poistuvaa nestettä ilmastettiin ja se syötettiin takaisin reaktoreihin. Nesteen palautus tapahtui joko manuaalisena lisäyksenä massan yläpinnalle tai pumpuilla tapahtuvana lisäyksenä massan sisälle.



KUVIO 7. Koejärjestelyt (Rikkinen 2006)

Varsinaisen kokeen aikana puhdistettavasta massasta ja suotonesteestä otettiin näytteitä, joista mitattiin mm. pH ja kuiva-ainepitoisuus sekä maljattiin mikrobi-näytteet. Lisäksi näytteistä analysoitiin mineraaliöljy- ja PAH-pitoisuuksia kaasukromatografisesti. Suoraan reaktoreista mitattiin ainoastaan lämpötila. (Malinen 2006; Rikkinen 2006.)

3.3 Ongelmat

Kylmälaukkuihin rakennettujen bioreaktoreiden kanssa työskennelleiltä henkilöiltä saatujen käyttökokemusten ja haastattelujen perusteella saatiin selville seuraavia ongelmia koskien reaktoreiden rakennetta ja käyttöä. Kommentit ovat lainattu 11.5.2006 pidetyn suunnittelutyöryhmän epävirallisesta pöytäkirjasta.

Korroosio aiheutti anodin nopeaa syöpymistä, minkä seurauksena massan läpi kulkenut virta heikkeni kokeen edetessä. Anodina toiminutta teräsverkkoa jouduttiin vaihtamaan kolmen viikon välein. Ongelmaa lievitettiin ottamalla käyttöön paksumpaa teräsverkkoa, jolloin vaihtoväliä saatiin pidennettyä.

Elektrodien vaihto verkosta sauvamaiseksi voisi lisätä niiden käyttöikä. Lisäksi elektrodien materiaalin vaihto tavanomaisesta teräksestä happo- tai kuparipäälytettiin teräkseen parantaisi elektrodien kestävyyttä huomattavasti. (Halme 2006.)

Vuotoja tapahtui lähes poikkeuksetta jokaisessa reaktorissa. Tämän aiheutti pääasiassa kylmälaukun kylkiin poratut reiät, joista reaktoriin tuotiin ja sieltä poistettiin nestettä tai ilmaa. Polypropeenista valmistettu ohut kylmälaukun kuori ei kestänyt reikien tekoa vaan se halkeili, jolloin nestettä pääsi vuotamaan kuoren väliin ja ulkopuolelle reaktoria.

Vuodot eivät varsinaisesti vaikuttaneet elektrokineettisten kokeiden onnistumiseen, mutta vähensivät merkittävästi käyttömukavuutta. Suurempia ongelmia koituisi, jos reaktoreilla pyrittäisiin mallintamaan kosteampia prosesseja kuin maaperän puhdistamista.

Näytteenotto koettiin hitaaksi ja vaivalloiseksi. Lisäksi näytteenotto vaati kylmälaukkujen kannen avaamisen, mikä ei tulisi kysymykseen jos reaktorin ilmatila haluttaisiin pitää suljettuna.

Maanäytteiden otto eri syvyyksiltä ja useista kohdista vaatii reaktorin runkoon useita näytteenottoaukkoja, jos kantta ei haluta avata. Kylmälaukun materiaali ei välttämättä kestä, jos reikien määrää kasvatetaan nykyisestä.

Veden painuminen osassa kokeista aiheutti reaktorin pohjalla olevan massan vettymisen ja siitä seurasi massan hapettomuus ja hajotustoiminnan hidastuminen.

Tämä johtui siitä, ettei kulkeutunut vaakasuorassa massan läpi elektrokinetiikan avulla vaan painui alaspäin, mihin ei ollut sijoitettu imuputkea. Lisäksi massan ja reaktorin pohjarakenteen välillä olleet reikälevyt, joiden tarkoituksena oli eristää puhdistettava massa huokoisesta pohjamateriaalista (kvartsihiekkä) olivat tukkeutuneet maa-aineksella. Tämä varmasti vaikutti nesteen kiertoon massan sisällä.

Massan läpi johdettava sähkövirta aiheutti korkeilla jännitteillä massan huomattavaa kuumenemistä, joka ei ole suotavaa mikrobitoiminnan kannalta. Suurilla jännitteillä pyrittiin parantamaan haitta-aineiden liikkumista puhdistettavassa maamassassa, mutta lämpötilan nousun vuoksi sitä ei voitu toteuttaa.

Mallinnuksen aikana reaktorit olivat huoneenlämmössä, joka oli korkeampi kuin todellisessa puhdistusprosessissa vallitseva lämpötila. Lisäksi reaktoreiden pieni tilavuus suhteessa elektrodien kokoon edesauttoi lämpötilan nousemista korkeammilla jännitteillä.

Haihtumista tapahtui avonaisten nestekiertojen ja avonaisten reaktoreiden vuoksi. Tämän vuoksi ei voitu tarkalleen määrittää kuinka suuri osa puhdistustuloksesta johtui haihtumisesta ja mikrobitoiminnasta.

Suoritettut kokeet toteutettiin maa-aineksella, joka oli pilaantunut useita vuosia aikaisemmin, jolloin voitiin olettaa, että haihtuvat yhdisteet olivat jo massasta haihtuneet ennen kokeen aloittamista. Ongelmia aiheutuu kuitenkin silloin, jos mallinnetaan prosesseja, joissa on läsnä helposti haihtuvia aineita. Suljettu järjestelmä vähentää huomattavasti haihtumista, mutta täysin sitä ei voida estää.

Nestettä kierrätettiin kokeesta riippuen joko manuaalisesti tai pumpuilla. Manuaalisessa lisäyksessä nestettä kaadettiin massan päällä olevalle Wettex-kankaalle, jonka tarkoituksena oli levittää neste tasaisesti massan alueelle.

Wettex-kangas ei välttämättä levitä nestettä täysin tasaisesti, joka voi aiheuttaa muita ongelmia kuten vuotoja, vettymistä ja hapettomuutta. Pumpuilla tapahtuva lisäys on tasaisempi mutta saattaa tapahtua liian pistemäisesti ilman laajalle levittävää kastelujärjestelmää, jolloin voi ilmetä samanlaisia ongelmia kuin manuaalisessa lisäyksessä.

3.4 Toiveita ja kehitysehdotuksia

Suunnittelutyöryhmä painotti erityisesti mallinnusreaktoreiden monikäyttöisyyttä, koska niiden on tarkoitus palvella kahta oppilaitosta opetus- ja tutkimuskäytössä, jolloin erilaisten prosessien mallintamisen mahdollisuus on etusijalla yhden prosessin tarkkaan seurantaan verrattuna. Monikäyttöisyys vaatisi reaktorien rungolta hyvää työstettävyyttä sekä mahdollisuutta lisätä erilaisia mittareita, laitteita tai rakenteita helposti ja nopeasti.

Alustavasti reaktorin tilavuudeksi kaavailtiin noin 25 litraa, jolloin reaktorista ei tulisi liian raskasta liikutella vielä täytenäkään. Tilavuus on kuitenkin tarpeeksi suuri, että tutkimustuloksia voidaan pitää vähintään suuntaa-antavina. Opetuskäytössä reaktorin pieni koko pitää käytännön järjestelyt mallinnettavissa prosesseissa mahdollisimman yksinkertaisina, jolloin välineistön käyttö ja valmistelu eivät vaadi kohtuuttomasti resursseja.

Tutkimuskäytössä reaktoreista pitäisi voida mitata tarpeen vaatiessa hyvinkin tarkkoja ja luotettavia arvoja, mutta opetuskäytössä pääasiallisena tavoitteena on havainnollisuus ja mahdollisuus toteuttaa yksinkertaisia kokeita mahdollisimman helposti.

Monikäyttöisyyden lisäksi, ja osittain siitä johtuen, näytteenotto oli seuraava merkittävä asia, jota työryhmä piti tärkeänä osana toimivaa mallinnusreaktoria. Edustavien näytteiden oton tulisi olla yksinkertaista ja nopeaa, varsinkin siinä tapauksessa että reaktoreita on toiminnassa useita samanaikaisesti, jolloin näytteitä joudutaan ottamaan suuria määriä. Maanäytteiden ohella myös vesi- ja ilmanäytteitä tulisi voida ottaa ilman suurempia esivalmisteluja.

Muita mittauksia tulisi voida suorittaa suoraan reaktorista. Lämpötilan ohella merkittäviä seurattavia parametreja olisi pH sekä kosteus, jotka olisi syytä saada selville ilman näytteenottoa. Edellä mainittujen parametrien seuraaminen prosessissa voisi tapahtua myös reaaliaikaisesti, jolloin saataisiin ajan tasalla olevaa informaatiota prosessin tilasta.

3.5 Mallinnettavia bioprosesseja

3.5.1 Prosessien vaatimukset

Suunnitteluvaiheessa pohdittiin myös millaisia bioprosesseja koereaktoreissa olisi tarkoitus mallintaa. Vaikka tutkimuksen taustalla oli elektrokineettisesti tehostettu maaperän biologinen puhdistaminen, oli hankkeen tarkoituksena luoda mahdollisimman monipuolinen mallinnusjärjestelmä, jolla voitaisiin toteuttaa useita erilaisia ympäristöbioteknisiä prosesseja.

Erilaiset prosessit luovat erilaisia vaatimuksia reaktoreille. Taulukkoon 1 on koottu neljän suunnitellun prosessin aiheuttamia vaatimuksia, joille on annettu painoarvo asteikolla 1-5 sen mukaan, kuinka merkittävä se on kyseisessä prosessissa. Arvo 1 tarkoittaa, että kyseinen prosessi ei aiheuta merkittäviä vaatimuksia reaktorille ja arvo 5 päinvastaista.

TAULUKKO 1. Prosessitekniset vaatimukset reaktoreille

	<i>Tiiveys</i>	<i>Fys. Kestävyys</i>	<i>Kem. Kestävyys</i>	<i>Näyteotto</i>	<i>Mittaukset</i>	<i>Oheislaitteet</i>	<i>Lämmön-eristys</i>
<i>Kompostointi</i>	1	2	4	4	4	3	5
<i>Maaperän puhdistus</i>	3	4	4	4	1	2	3
<i>Jäteveden käsittely</i>	5	2	2	4	4	4	1
<i>Biosuodatus</i>	5	3	3	2	2	3	1

Seuraavissa kappaleissa on esitelty lyhyesti prosessit, joiden toteuttamista reaktoreissa on suunniteltu. Kompostoinnista ja maaperän puhdistuksesta on kerrottu enemmän myös testauksien yhteydessä kappaleissa 6 ja 8.

3.5.2 Komposti

Ensimmäinen mallinnettava prosessi ja testausmenetelmä oli jo suunnitteluvaiheessa selvillä. Lahden ammattikorkeakoulussa syksyllä 2006 järjestettävässä ympäristön bioprosessit opintojaksolla oli tarkoitus järjestää käytännön työ kompostointiprosessista ja sen seuraamisesta. Reaktoreiden oheismateriaalien hankinta keskittyikin pääasiassa kompostointikokeen järjestämisen tarpeisiin.

Kompostointiprosessi on suhteellisen helppo toteuttaa ja tämän vuoksi se valittiinkin ensimmäiseksi testausmenetelmäksi. Kompostointiprosessin haasteita ovat ilmastus, massan kuohkeus, kosteus ja ravinteet, joiden lisäksi kompostointiprosessiin vaikuttaa oleellisesti lämpötila. Haasteet oletettiin olevan prosessiteknisesti helposti hallittavissa.

Kompostoinnissa reaktorin sisällä oleva massa on melko kevyttä, eikä se aiheuta juurikaan fyysistä raskautta reaktorin rungolle. Sen sijaan kompostoinnissa pH:n vaihtelut voivat olla melko suuria, mikä voi aiheuttaa kemiallista kulutusta. Kompostoinnissa syntyvät hajut ja niiden imeytyminen reaktorin runkoon on myös otettava huomioon runkomateriaalia valittaessa.

Kompostointiprosessin seuranta on yksinkertaista, vaikka kompostointiprosessissa on useita vaikuttavia ohjausparametreja. Lämpötila, pH ja kosteus ovat yksinkertaisia mitata ja antavat melko laajan kuvan kompostin toiminnasta. Lisäksi kompostin tilaa voidaan seurata kattavasti näytteenotolla.

3.5.3 Maaperän puhdistus

Kuten kompostointiprosessi, myös maaperän puhdistus tapahtuu reaktoreissa panosprosessina. Kompostointimassasta eroten maaperä on tiiviimpää ja voi sisältää kovia kappaleita, jotka saattavat vaurioittaa reaktorin runkoa. Tiiviimmän massan sekoittaminen reaktoreissa on myös vaikeampaa. Puhdistettavasta maaperästä riippuen maa-aines voi sisältää esimerkiksi hiilivetyjä, klooria tai muita haitallisia aineita, joiden vaikutus tulee selvittää valitulle runkomateriaalille.

Maaperää puhdistettaessa näytteenotto on tärkeämpää kuin mittaukset suoraan reaktorista. Tämän vuoksi reaktorissa tulee olla kattavasti näytteenottopisteitä ja niihin sopivat näytteenottimet. Puhdistusprosesseissa, joissa käytetään nesteen kierrätystä tai massan ilmastusta, reaktoreiden tiiveyden merkitys korostuu. Myös herkästi haihtuvilla yhdisteillä pilaantuneita maita puhdistettaessa on tärkeää, ettei haihtumista pääsisi tapahtumaan siinä määrin, että se vaikuttaisi puhdistustuloksiin.

3.5.4 Jäteveden käsittely

Jäteveden käsittely tapahtuu nimensä mukaisesti nestemäisissä olosuhteissa, joten reaktorin tiiveys on hyvin tärkeää. Tämän lisäksi reaktorin ilmastus ja sekoitus sekä useiden reaktoreiden kytkeminen sarjaan tulee olla tehokasta ja helppoa. Jäteveden käsittelyprosessissa reaktoreista tulee voida mitata pH ja lämpötila sekä jäteveden ja ilman virtauksia.

Jätevesi ei juurikaan kuluta reaktoreja fyysisesti, mutta pH ja erilaiset liuottimet voivat aiheuttaa kemiallista rasiutusta rungoille. Jäteveden käsittely vaatii myös

paljon lisälaitteita varsinaisten reaktoreiden ohella, koska reaktoreita tulee sekoittaa, ilmastaa ja jätevedettä mahdollisesti kuljettaa reaktorista toiseen.

Jäteveden käsittelytapoja on useita ja niistä on erilaisia variaatioita muun muassa ilmastus- ja syöttötapojen suhteen, jotka joudutaan ottamaan huomioon järjestelmää tarkemmin suunniteltaessa.

3.5.5 Biosuodatus

Biosuodattimessa reaktorin lävitse kulkee ainevirta, joka on joko kaasua tai nestettä. Tämä aiheuttaa kovia vaatimuksia reaktorin tiiveydelle ja erilaisten liitännöiden toimivuudelle. Biosuodattimen suodatinmateriaali on kiinteää, joka voi itsessään rasittaa reaktoria fyysisesti. Suodatinmateriaali ei kuitenkaan ole liikkeessä, jolloin hankausta tai kulumista ei pitäisi syntyä. Suodatettava aine voi kuluttaa runkoa kemiallisesti, jos se sisältää syövyttäviä tai liuottavia yhdisteitä.

Biosuodatuksessa näytteenotto ja mittaukset ovat hivenen yksinkertaisempia kuin jäteveden käsittelyprosessissa, koska valtaosa näytteistä otetaan joko ennen tai jälkeen reaktoria sinne tulevasta tai sieltä poistuvista virtauksista. Näytteenotto, varsinkin biosuotimesta jossa puhdistetaan kaasuja, on hyvin alttiina virheille, mikä tulee ottaa huomioon järjestelmää ja näytteenottoa suunniteltaessa.

4 KOEREAKTORI

4.1 Runko

Tuotantoprosesseissa bioreaktori on yleisesti valmistettu ruostumattomasta tai haponkestävästä teräksestä, joka on varustettu mekaanisella sekoittimella. Teräs kestää steriloinnin ja reaktorin runkoon tehtävät erilaiset läpiviennit instrumentointia varten. (Sajamo 1997.)

Teräs kuitenkin on materiaalina kallis ja raskas vaihtoehto ympäristöbioprosessien reaktorirungon materiaaliksi. Ympäristön bioprosesseissa sterilointi ei ole niin merkittävässä osassa kuin tuotannollisissa prosesseissa. Lisäksi reaktorien rungoilta vaadittiin liikuteltavuutta, mikä asettaa rajoituksia rungon materiaalille. Teräs ei myöskään toimi itsessään eristeenä, vaan vaatii lähes aina jonkinlaisen lämmönsiirtimen. Tämän vuoksi suunnitteluryhmä ei katsonut tarpeelliseksi ottaa terästä yhdeksi reaktorin rungon materiaalivaihtoehdoksi.

Reaktorin rungon materiaalivaihtoehdoiksi suunniteltiin polyeteeniä (PE), polypropeenaa (PP), polyuretaania (PUR) sekä lujite- ja kestumuovin komposiittiyhdistelmää. Taulukossa 2 on esitetty eri materiaalivaihtoehdot, mahdolliset valmistustavat sekä muutamia merkittävimpiä hyviä ja huonoja puolia. Materiaaleista ja niiden käyttäytymisestä ja valmistuksesta on koottu tietoa Muovin suomalaisesta käsikirjasta (Järvinen 2000), internetistä (Vink Oy, <http://www.vink.fi>) ja Reijo Heikkiseltä, joka toimi suunnitteluajana Lahden ammattikorkeakoulun muovitekniikan laboratorioinsinöörinä. Myös tarjouspyyntöihin vastanneet yritykset toivat omaa näkemystään materiaali- ja rakennevalintoihin.

TAULUKKO 2. Rungon materiaalivaihtoehdot

<i>Materiaali</i>	<i>Lyhenteet</i>	<i>Hyvät puolet</i>	<i>Huonot puolet</i>	<i>Valmistus</i>
<i>Polyeteeni</i>	PE PE-HD	Edullisuus, kulutuskestävyys, kemiallinen kestävyys, muokattavuus	Ei kestä kuumaa, mittapitävyys, UV-valo	Itse putkesta Teettäminen
<i>Polypropeeni</i>	PP PP-H	Kemiallinen kestävyys, sähköneristys, muokattavuus,	Turpoaminen, jätehapot, kulutuksen kesto, pakaskestävyys	Itse putkesta Teettäminen
<i>Polyuretaani</i>	PUR	Edullinen, kulutus- ja säänkestävyys, muokattavuus	Ei kestä kuumaa, kemiallinen kestävyys, turpoaminen	Teettäminen
<i>Komposiitti</i>	Epoksi / Lasikuitu PP / PE	Kova kuori, kestävä sisäpinta	Hinta, raskas, muokattavuus	Teettäminen

Komposiittirakenne yhdistää kemiallisesti kestävät PP:n ja PE:n kestäväan luji-temuoviseen rakenteeseen. Tällaisen reaktorin valmistus on kuitenkin huomattavasti kalliimpaa muihin vaihtoehtoihin verrattuna. Komposiittirakenteella saavutettava paineensietokyky ei ole olennainen tämän mittakaavan opetus- ja tutkimuskäytössä, joten raskas rakenne ei ole tarpeen. Komposiittirakenteisen reaktorin valmistaminen vaatii erikoislaitteita ja ammattitaitoa, joten sen omatoiminen valmistaminen ei tule kysymykseen.

Polyuretaani on huomattavasti halvempi materiaali sen yksinkertaisen valuprosessin ansiosta, mutta kuumat ja kosteat olosuhteet aiheuttavat polyuretaanin turpoamista. Tämä tekee muuten hyvästä materiaalista hieman epäkäytännöllisen bioprosessien reaktoriin, koska valtaosa prosesseista kehittää kosteutta ja lämpöä. Valuprosessiin tarvittavia koneita ei löydy Lahden ammattikorkeakoulun tiloista, jolloin polyuretaanista valmistettu reaktori tulisi teettää muualla.

Polypropeeni on hyvin lähellä polyeteenin ominaisuuksia. PP:n merkittävin huono puoli on sen heikko kulutuksen kestävyys. Tämä voi edistää reaktorin sisä- ja ulkopintojen kulumista, jolloin reaktoreiden käyttöikä lyhenee. Laboratoriokäytössä pienikokoisia reaktoreita liikuteltaessa myös niiden ulkopinnat saattavat kolhiintua helposti. Polypropeenin kemiallinen kestävyys tekisi siitä hyvän vaihtoehdon komposiittirakenteen sisäpinnan materiaaliksi, mutta yksirakenteisessa reaktorissa se ei ole niin hyvä ratkaisu kuin polyeteeni. Polypropeenisten reaktoreiden valmistus onnistuisi omatoimisesti hitsaamalla pohjalevyt kiinni sopivan kokosiin polypropeeniputkiin. Kannet voitaisiin valmistaa polypropeenilevystä sahaamalla.

Uuden reaktorirungon materiaaliksi valittiin lopulta tiheä **polyeteeni** (PE-HD), jonka ominaisuudet vastasivat parhaiten rungon materiaalille asetettuja vaatimuksia. PE-HD on polymeroimalla valmistettu kestonuovi, joka suuren molekyyli-painonsa ansiosta on kova ja hyvin kulutusta kestävä. Materiaalia käytetään lukuisissa kohteissa juuri sen kestävyuden sekä suhteellisen edullisen hinnan vuoksi. PE-HD:n ominaispiirteitä ovat myös hyvä kemiallinen kestävyys sekä vähäinen veden läpäisevyys. Valintaa vahvisti vielä polyeteenin helppo työstettävyys, joka mahdollisti jälkeempään tapahtuvat muokkaukset reaktorin runkoon. (Järvinen 2000.)

Reaktorin rungon muodoksi valittiin sylinteri. Sylinterimäinen muoto mahdollistaa neliömäistä rakennetta paremmin laajemmat mittaukset vähemmällä mittauspisteillä. Lisäksi sylinterissä säilyy neliömäistä rakennetta paremmin prosessin homogeenisyys, aineen, hapen ja lämmön sekoittuessa paremmin reaktorin koko tilavuuteen.

Polyeteenistä valmistettavat rungot päätettiin teettää ajan säästämiseksi ja valmistusvirheiden minimoimiseksi. Suunnitelmien mukainen reaktorin runko tilattiin tarjouskilpailun perusteella muovituotteita valmistavalta suomalaiselta Soft Diamond Oy:ltä. Kankaanpäässä toimiva yritys myy ja valmistaa polyuretaanielasto-meeri-, lujitemuovi- sekä kestonuovituotteita mm. kemianteollisuuden käyttöön. (Soft Diamond Oy.)



KUVIO 9. Reaktorirunko

Valmis reaktorirunko on esitetty kuviossa 9. Runkoon on tehty läpiviennit ja kiinnitetty kaapelitiivisteiden kiinnitysholkit. Taulukossa 3 on esitetty reaktorin mitat. Reaktorin vaippa valmistettiin valmiista halkaisijaltaan 320 mm polyeteeniputkesta, joka pienensi reaktorin tilavuutta suunnitellusta 25 litrasta noin 22 litraan. Valmistusvaiheessa levennettiin hieman myös kannen ja rungon välissä olevaa lieriä, joka mahdollistaa paremman nosto-otteen reaktoria siirrettäessä. Nämä muutokset eivät kuitenkaan olennaisesti vaikuta reaktorin toimintaan.

TAULUKKO 3. Rungon mitat

Ulkokorkeus	h_u	380	mm
Sisäkorkeus	h_s	360	mm
Ulkohalkaisija	d_u	320	mm
Sisähalkaisija	d_s	280	mm
Seinämän paksuus	w_s	20	mm
Pohjan paksuus	w_p	20	mm
Lierin leveys	w_l	35	mm
Tilavuus	V	22,17	l
Tilavuus, kannella	V_k	20,94	l
Tilavuus, välipohjalla	V_{vp}	19,09	l
Tilavuus, kansi + välipohja	V_{kvp}	17,86	l
Pohjan pinta-ala	A	61575	mm ²

4.2 Kansi

Reaktorin kansi tilattiin rungon yhteydessä samalta valmistajalta. Se valmistettiin hitsaamalla kaksi pyöreää PE-HD-levyä kiinni toisiinsa. Kansi painuu noin 20 millimetriä rungon sisään, jolloin se pysyy paikallaan ilman erillisiä kiinnikkeitä. Tämä pienentää hieman reaktorin kokonaistilavuutta (Taulukko 3).

TAULUKKO 4. Kannen mitat

Kannen ulkohalkaisija	h_{ku}	350	mm
Kannen sisähalkaisija	h_{ks}	275	mm
Kansilevyn paksuus	w_k	20+20	mm
Kansilevyn tiivisteiden leveys (musta)	d_{ktm}	15	mm
Kansilevyn tiivisteiden leveys (ruskea)	d_{ktr}	10	mm

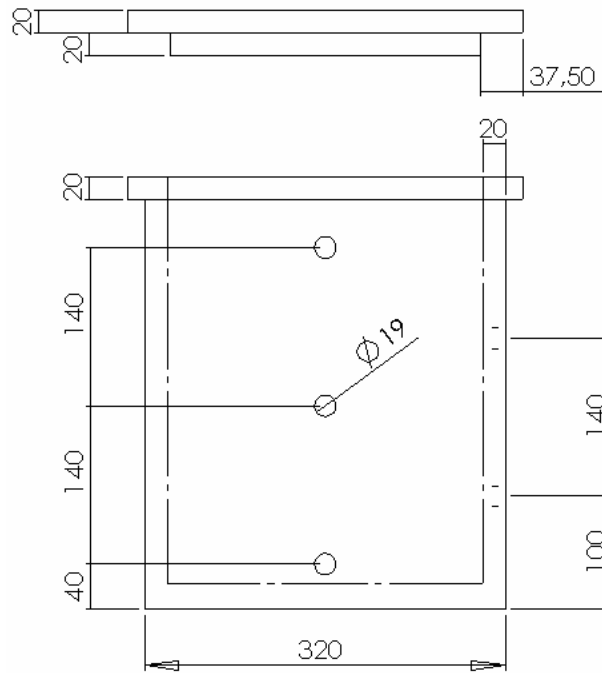
Kanteen kiinnitettiin jälkepäin kumiset tiivisteet (Kuvio 10). Tiivistämiseen käytettiin kahta erilaista tiivistenauhaa, mutta käytännössä ei niiden välillä huomattu mitään eroa. Kannen ja tiivisteiden mitat on esitetty taulukossa 4.



KUVIO 10. Kansi

4.3 Läpiviennit

Valmiisiin runkoihin porattiin instrumentointia ja näytteenottoa varten viisi läpiviientä. Läpiviennit porattiin kahteen riviin kuvion 11 mukaisesti. Poraus suoritettiin pylväsporakoneella Lahden ammattikorkeakoulun tiloissa käyttäen 19 mm poranterää.



KUVIO 11. Reaktorirungon mitat ja läpivientien sijoitus

Läpivienteihin kierrettiin halkaisijaltaan 20 mm messinkiset kaapelitiivisteet (kuvat 12a ja 12b), joissa oli 12 millimetrin kiinnityskierre. Läpivienteihin ei tehty erillistä kierrettä tiivisteille, vaan tiiviste kiersi itselleen uran muoviseen runkoon. Kaapelitiivisteet mahdollistavat halkaisijaltaan 7 – 13 millimetrin kaapelin tai putken tiivistämisen ilman tiivisteiden vaihtoa. Ohuempia kaapeleita voidaan leven-tää, jotta läpivienti säilyy tiiviinä. Taulukoissa 6 ja 7 on esitetty kaapelitiivisteiden ominaistiedot.



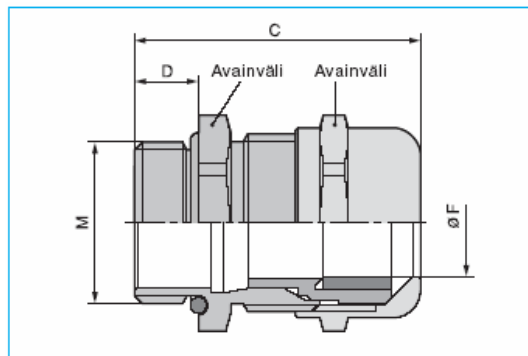
TAULUKKO 6. Kaapelitiivistein materiaalit
(SKS Tuotekuvasto)

Runko	Niklattu messinki
Sisäosa	Polyamidi
Tiivisterengas	Neopreeni
O-rengas	Perbunan

KUVIO 12a. Kaapelitiiviste MS-M (SKS Tuotekuvasto)

TAULUKKO 7. Kaapelitiivistein mitat (SKS Tuotekuvasto)

<i>Laji</i>	<i>Liitäntä- kierre M</i>	<i>Kaapelille Ø F mm</i>	<i>Avainväli mm</i>	<i>C mm</i>	<i>D mm</i>
MS-M	20 x 1,5	7 – 13	24	35,5	8



KUVIO 12b. Kaapelitiivistein mitat (SKS Tuotekuvasto)

4.4 Välipohja

Suunnittelussa tuli ilmi tarve muodostaa ilmatilaa reaktorin pohjalle muulla tavoin kuin soraa käyttämällä. Tämän vuoksi tilattiin tarjousten perusteella Keroplast Oy:ltä Orimattilasta jokaiseen runkoon rei'itetty välipohjalevy. Levyn materiaaliksi valittiin polypropeeni (PP), koska PE-HD levyä ei ollut tarpeeksi nopeasti saatavilla. PP:n ominaisuudet ovat hyvin lähellä runkomateriaalina olevan PE-

HD:n ominaisuuksia. Välipohjalle valmistettiin Lahden ammattikorkeakoulussa väliaikainen koroke polyeteeniputkesta sahatuista renkaista. Renkaihin porattiin reiät, jotta niiden sisälle valuva vesi voidaan johtaa tarvittaessa ulos. Korokkeen ja välipohjan (Kuvio 13) mitat on esitetty taulukossa 8.

TAULUKKO 8. Välipohjan ja korokkeen mitat

Pohjakorokkeen korkeus	h_{pk}	50	mm
Pohjakorokkeen halkaisija	d_{pk}	150	mm
Pohjakorokkeen reikien halkaisija	d_{pkr}	20	mm
Välipohjan halkaisija	d_{vp}	270	mm
Välipohjan reikien halkaisija	d_{vpr}	5	mm
Välipohjan reikien välimatka	l_{vpr}	20	mm
Välipohjan reikien lukumäärä		134	kpl

Välipohjan käyttö pienentää reaktorin tilavuutta noin kolmella litralla. Kannen ja välipohjan käyttö pienentävät reaktorin tilavuuden noin 22 litrasta hieman alle 18 litraan. (Taulukko 3)



KUVIO 13. Välipohja

5 OHEIS- JA MITTALAITTEET

5.1 Pumput

Kooreaktoreihin on tarkoitus siirtää koneellisesti niin ilmaa kuin nestettä. Ilman siirtoa varten hankittiin kaksi kappaletta ilmapumppuja. Pumput hankittiin syksyllä 2006 käynnistyvää kompostikoetta silmälläpitäen, mutta tarjouskilpailussa otettiin huomioon myös kestävyys, pumpun käyttöikä ja teho, jotta sitä voidaan käyttää myös muissa reaktoreilla tehtävissä kokeissa ja tutkimuksissa. Nesteen siirtoa ei kompostikokeissa tarvittu, joten nestepumppujen hankinta siirrettiin vuoden 2007 puolelle.

Pumpuiksi valittiin OPAM Instruments Oy:n maahantuoma Nitto-vakuumpumppu mallia VC0301B. Pumpun teho on maksimissaan 50 l/min ilman virtausesteitä, mutta vielä 0,1 barin paineella teho on noin 25 l/min. Taulukossa 9 on esitetty pumpun tekniset tiedot. Pumpun komponentit, jotka joutuvat pumpattavan ilman kanssa tekemisiin, kestävät liuottimia ja soveltuvat siksi hyvin ympäristöbioprosesseihin, joissa pumpattava ilma saattaa sisältää erilaisia yhdisteitä. (Opam Instruments Oy.)

TAULUKKO 9. VC0301B –tekniset tiedot (Opam Instruments Oy)

Paine	0,1 bar
Virtausnopeus	25 l/min
Maksimipaine	0,2 bar
Maksimialipaine	0,213 bar
Imuputken \varnothing	10,5 mm
Tuloputken \varnothing	8,5 mm
Käyttöikä	10000 h
Teho	27 W
Jännite	120 V / 230 V AC
Taajuus	60 Hz / 50 Hz

Pumput kiinnitettiin alustalevyyn Lahden ammattikorkeakoulussa ja niihin liitettiin käynnistyskytkin sekä runsaasti sähköjohtoa pumppujen sijoittamisen helpottamiseksi. Alustalevyn tarkoituksena on pitää pumput tukevasti paikoillaan käytön aikana (Kuvio 14).



KUVIO 14. Pumput alustalevyssä

Sähköjohtoihin liitettiin vikavirtasuojakytkimet (kuvio 15) henkilösuojaimiksi, koska pumppuja ei välttämättä aina käytettäisi laboratoriotiloissa, joissa vikavirtasuojakytkin on yleensä kiinteänä asennuksena sähkökaapissa. Vikavirtasuojakytkimen tarkoituksena on katkaista sähkövirta, kun kytkimeen tulevan ja siitä lähtevä sähkövirta eroavat toisistaan, eli toisin sanoen virtaa vuotaa pumpun moottorista sen runkoon.



KUVIO 15. Vikavirtasuojakytkimet

5.2 Putket

Letkut ja putket ovat olennainen osa mallinnusjärjestelmien aineen ja ilman siirrossa. Letkuina käytettiin läpinäkyviä polyvinyylidikloridista (PVC) valmistettuja yksikerroksisia kudoksettomia muoviletkuja. Letkut ovat elintarvikekelpoisia ja soveltuvat juomavesikäyttöön, jolloin niistä ei koidu haittaa myöskään reaktoreissa tapahtuvalle mikrobitoiminnalle. Letkujen käyttölämpötila on $-20\dots+60$ °C. PVC-letkut eivät kuitenkaan sovellu polttoaineen siirtoon, joten voimakkaasti polttoaineilla tai muilla öljypohjaisilla aineilla pilaantuneiden maiden puhdistuksen mallintamisessa tulee käyttää esimerkiksi polyuretaanista valmistettuja letkuja. (Oy Toppi Ab, 2007)

Letkuja hankittiin kolmea erilaista kokoluokkaa, jotka mahtuvat sisäkkäin. Tällöin voidaan muodostaa helposti melko tiiviitä liitoksia ilman erillisten venttiilien käyttöä. Taulukossa 10 on esitetty muoviletkujen halkaisijat.

TAULUKKO 10. Muoviletkujen halkaisijat (ulko/sisä)

Suuri	d_{ms}	11,6/8,0	mm
Keskikoko	d_{mk}	8,2/5,0	mm
Pieni	d_{mp}	5,4/3,0	mm

5.3 Sintterit

Ilman syöttämiseen reaktorin sisällä käytettiin putkimaisia sinttereitä (kuvio 16), jotka on valmistettu ruostumattomasta teräksestä. Sintterin tarkoituksena on jakaa syötettävää ilmaa tasaisemmin reaktorin tilavuuteen.



KUVIO 16. Sintterit

Muita kaasujen syötössä käytettäviä välineitä ovat esimerkiksi ilmastusrenkaat ja -levyt, jotka toimivat hieman sintteriä tehokkaammin ilmastaen suurempaa pinta-alaa. Sinttereitä oli kuitenkin Helsingin Yliopiston ympäristöekologian laitoksella valmiina, joten uusia välineitä ilmastukseen ei koettu tarpeelliseksi hankkia. Sinttereiden mittatiedot on esitetty taulukossa 11.

TAULUKKO 11. Sinttereiden mitat

Sintterin pituus	l_s	305	mm
Sintterin ulkohalkaisija	d_{su}	6	mm
Sintterin sisähalkaisija	d_{ss}	4	mm
Sintterin rei'itetyn osan pituus	l_{sr}	50	mm
Sintterin reikien halkaisija	d_{sr}	2	mm

5.4 Venttiilit

Venttiileitä mallinnusjärjestelmään hankittiin kahta eri tyyppiä. Pumppujen tehonsäätöä varten ostettiin Kytölä Instruments Oy:ltä kaksi kappaletta säädettäviä virtausmittareita mallia EK-5ER (Kuvio 17). Mittareilla voi säätää asteikon mukaan ilmavirtaa välillä 7,5 - 47,5 l/min. Samoilla mittareilla voi myös säätää nesteen virtausta, mutta asteikko ei tällöin pidä enää paikkaansa. Mittareiden säätö tapahtuu ruuviventtiilillä, joka rajoittaa mittarin läpi kulkevaa virtausta. Mittarin tekniset tiedot on esitetty taulukossa 12. (Kytölä Instruments Oy, 2006.)



TAULUKKO 12. EK-5ER tekniset tiedot (Kytölä Instruments Oy)

Paino	170g
Venttiilin runko/tulpat	Nylon
Venttiilin neula	AISI 316
Runko	Akryyli (PMMA)
Tiivisteet	Nitriili (**Viton®, EPDM)
Max. paine	20 bar (30 bar/30 °C)
Max. lämpötila	75 °C
Liitännät	R ¼
Tarkkuus	± 5 % F.S. (H ₂ O, +20 °C)

KUVIO 17. EK-5ER säädettävä virtausmittari (Kytölä Instruments Oy)

Säädettävien virtausmittareiden lisäksi hankittiin suljettavia venttiileitä, joilla voidaan ohjata esimerkiksi ilman tai nesteen kulkua eri putkiin. Venttiilit ovat alun perin tarkoitettu akvaarioiden ilmastuksen säätelyyn, mutta niitä on käytetty aikaisemmin muissa Helsingin Yliopiston ympäristöekologian laitoksen koejärjestelyissä hyvin tuloksin. Kuviossa 18 venttiilit toimivat kompostikokeessa ilmastuksen jakajina viiteen eri kompostireaktoriin. Venttiilit on valmistettu ruostumattomasta teräksestä, ja niiden sisään- sekä ulosmenojen ulkohalkaisija on noin 5 millimetriä.



KUVIO 18. Sulkuventtiilit

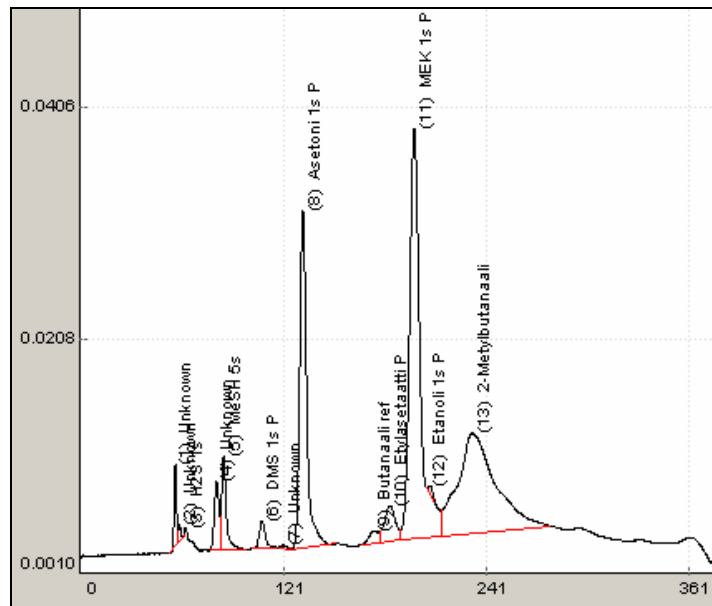
5.5 Kaasukromatografi

Reaktoreita suunniteltaessa otettiin huomioon myös mahdollisuus mitata poisto-kaasujen koostumusta ja pitoisuutta käyttämällä Lahden ammattikorkeakoulun kannettavaa kaasukromatografia (Kuvio 19). Kaasukromatografi kytketään kiinni reaktoriin erillisen näytteenottoletkun kautta, ja sitä ohjataan laitteeseen kytketyn tietokoneen kautta. Kaasukromatografi havaitsee yhdisteistä riippuen jopa alle 1 ppb:n ja yli 10000 ppm:n pitoisuuksia. Analysoitavia kaasuja verrataan laitteeseen tallennettuihin yhdistekirjastoihin, jolloin yhdisteet ja niiden pitoisuudet voidaan tunnistaa.



KUVIO 19. Photovac Voyager GC-PID

Kaasukromatografian kytkeminen reaktoreihin onnistuu nopeasti kiinnittämällä näytteenottoletku läpiviennin kaapelitiivisteseen. Laitteen valmistelu tietokoneohjelman avulla ei vie kuin muutamia minutteja, jonka jälkeen laite on käyttövalmis. Laitteen käyttö on yksinkertaista ja melko nopeaa verrattuna muihin analyysilaitteisiin, ja tulokset saadaan näkyville välittömästi kromatogrammeina (Kuvio 20), joissa näkyvät havaitut yhdisteet ja pitoisuudet. Nämä ominaisuudet mahdollistavat laitteen ja koereaktoreiden tehokkaan yhteistoiminnan esimerkiksi opetuskäytössä, jossa yleensä ei ole aikaa suorittaa monimutkaisia analyysejä.



KUVIO 20. Kromatogrammi (GC-PID)

5.6 pH-mittari

Reaktoreissa vallitsevien prosessien happamuuden mittaamiseen suunniteltiin käytettävän Lahden ammattikorkeakoulun kannettavaa pH-mittaria. IQ150 ISFET –mittarissa (Kuvio 21) anturina toimii lasiton PH77 –SS, joka on suojattu ruostumattomalla teräsputkella. Lisäksi mittalaitteella ja samalla anturilla voidaan mitata lämpötilaa, jonka avulla voidaan kalibroida ja tarkistaa muiden lämpötilaantureiden toimintaa.

Anturi ja mittalaite on suunniteltu kenttäkäyttöön, joten ne molemmat kestävät normaaleja laboratoriolaitteita paremmin niin kemiallista kuin mekaanista rasitusta. Mittalaitteen tekniset tiedot on ilmoitettu taulukossa 13.

TAULUKKO 13. IQ150-pH-mittarin tekniset tiedot (ThermoWorks)



Mittari	IQ150 pH/mV/Temperature
Anturi	Lasiton anturi tai lasielektrodi
Mittausalue	0,00 - 14,00 pH ±1999 mV 0 – 100 °C
Erottelukyky	0,1 - 0,01 pH 0,1 - 1 mV 0,1 °C
Virheettömyys	± 0,01 pH ± 0,1 mV ± 0,5 °C
Toiminta-aika (akulla)	200 h
Mitat	90mm x 180mm x 40mm

KUVIO 21. IQ150 pH/mV/Temperature –mittari (ThermoWorks)

Mittapää mahtuu reaktoriin kaapelitiivisteeseen lävitse, jolloin pH:ta voidaan mitata reaktorin kantaa avaamatta.

5.7 Lämpötilan mittaus

Lämpötilan mittausta varten hankittiin kaksi 8-kanavaista lämpötilaloggeria antureineen. Mittausjärjestelmäksi valittiin tarjouskilpailun perusteella Probyte – verkkokaupan MrSmart-datalogger, joka on sarjaliikenteellä toimiva digitalisointisovitin. Sovittimeen voidaan laittaa kahdeksan digitaalista lämpötila-anturia tai 5 analogista anturia. Tiedonsiirto dataloggerista PC:lle tapahtuu sarjaliikenteellä. (Probyte Oy, 2006.)



KUVIO 22. MrSmart-lämpötilaloggeri ja anturit (Probyte Oy)

Itse laitteen mukana toimitettiin tiedonkeruuohjelma sekä graafinen tulostusohjelma PC:lle. Tiedonkeruuohjelma tallentaa datan Excel -yhteensopivassa muodossa, jolloin tiedon jatkokäsittely on vaivatonta.

Kuviossa 22 esitetyn dataloggerin mukana toimitettiin 16 kappaletta valmiiksi kytkettyjä digitaalisia lämpötila-antureita mallia SMT160-30. Antureiden tarkkuudeksi on valmistaja antanut $0,7\text{ °C}$ ja erotuskyvyksi $0,2\text{ °C}$. Käyttölämpötila on laaja $-45 - +130\text{ °C}$, mikä vastaa kaikkien mallinnettavien ympäristön bioprosessien lämpötilan vaihteluita. Antureita ei ole juurikaan suojattu erikseen, joten ne on syytä sijoittaa esimerkiksi muoviputkeen, jos mitataan hyvin kosteissa, syövyttävissä tai mekaanisesti rasittavissa olosuhteissa.

Anturit voidaan helposti sijoittaa reaktoriin käyttämällä rungon läpivientejä. Tiivistys ja suojaus tapahtuvat yksinkertaisesti sijoittamalla anturi tiiviiseen muoviputkeen. Dataloggereita on kaksi, jolloin kahta kuuden reaktorin sarjaa voidaan käyttää eri paikoissa ilman ongelmia lämpötilan mittauksen järjestämisestä. Antureiden kytkentäkaapeli dataloggeriin on reilun metrin mittainen, mutta sitä voidaan helposti jatkaa. Dataloggerilta tietokoneelle kulkeva sarjakaapeli voi olla useiden metrien mittainen, jolloin tietokoneen ei tarvitse olla reaktoreiden välittömässä läheisyydessä.

6 KUSTANNUSARVIO

Tässä osiossa tarkastellaan koereaktoreiden kustannuksia. Mukaan ei ole laskettu omaa työtä, johon kuuluivat esimerkiksi suunnittelu, reaktorirunkojen työstäminen tai koejärjestelmien rakentaminen. Lisäksi olemassa oleville mittalaitteille, kuten kannettavalle kaasukromatografille, tietokoneelle tai pH-mittarille ei ole laskettu kustannuksia. Hinnat on laskettu verottomina koko 12 reaktorin sarjalle. Jakamalla kokonaissumma reaktoreiden lukumäärällä saadaan arvio yhden reaktorin hinnasta. On kuitenkin huomioitava, että runkojen teettäminen on halvempaa suurempina sarjoina.

TAULUKKO 14. Reaktoreiden kustannusarvio

<i>Osa</i>	<i>Määrä</i>	<i>à hinta</i>	<i>Yhteensä</i>
Reaktorin rungot	12	100	1200
Pumput	2	160	320
Lämpötilaloggerit	2	100	200
Virtausmittarit	2	70	140
Välipohjat	12	10	120
Jakovenntiilit	2	20	40
Yhteensä			2020

Taulukossa 14 esitettyjen osien lisäksi runkojen muokkaukseen käytettiin esimerkiksi tiivisteitä, joiden kokonaishinnaksi voidaan arvioida noin 100 euroa. Tämän lisäksi järjestelmän käyttöön koetilanteissa tarvittiin erilaisia letkuja, liittimiä ja muita oheismateriaaleja.

Yhden reaktorin hinnaksi tulee näin ollen noin 150–200 euroa riippuen hieman siitä, kuinka paljon järjestelmän käytössä kuluvia materiaaleja otetaan mukaan laskelmaan.

7 TESTAUS 1: KOMPOSTIKOE

7.1 Toteutus ja tarkoitus

Ensimmäinen reaktoreiden toimivuutta mittaava testaus tehtiin Lahden ammattikorkeakoulussa ympäristötekniikan koulutusohjelman opintojakson osana marraskuussa 2006. Ympäristönsuojelun bioprosessit –opintojaksolla tehty käytännön työ sisälsi kompostoitumisprosessin mallintamisen ja seurannan. Opintojaksolle osallistuneilla opiskelijoilla oli mahdollisuus tutustua käytännössä kompostointiprosessiin ja sen ohjaukseen. Opintojaksolle osallistui 43 opiskelijaa, joista muodostettiin 13 ryhmää, jokainen ryhmä hoiti vuorollaan reaktoreista tapahtuvat mittaukset ja näytteenoton. Ryhmät saivat vapaasti valita ajan, jolloin tehtävät tulittiin suorittamaan, mikä aiheutti jo sinällään epäsäännöllisyyttä mittaustuloksiin. Tämän ei kuitenkaan katsottu olevan merkittävää, koska työssä testattiin bioreaktoreiden toimivuutta sekä soveltuvuutta opetuskäyttöön. Lisäksi saatiin käyttökokemuksia oheis- ja mittalaitteiden toiminnasta sekä yhteensopivuudesta reaktorirunkojen kanssa. Työssä saatiin myös kokemuksia yksinkertaisten ja helposti suoritettavien laboratorioanalyysien yhteensopivuudesta tämän kaltaisiin käytännön töihin. Tarkoituksena oli myös kartoittaa mahdolliset ongelmat koereaktoreiden käytössä. Ryhmiltä kerättiin palautetta mittaustilanteessa suullisesti sekä kirjallisen palautekyselyn muodossa kokeiden jälkeen.

7.2 Koejärjestelyt

Kokeessa käytettiin kaikkia kahtatoista koereaktoria, joiden avulla mallinnettiin kuutta erilaista kompostia, jotka ovat esitetty taulukossa 15. Jokaisesta kompostista tehtiin rinnakkainen koe. Kompostoitava massa oli yhdyskuntien biojätettä, jota sekoitettiin tukiaineeseen. Tukiaineena toimi puuhake ja kuivattu metsäteollisuuden jätevesiliete.

Yhteensä tukiaineen ja biojätteen suhde komposteissa oli 1:1. Lietteellä korvattiin komposteissa L1-L4 puolet tukiaineena käytettävästä hakkeesta. Tarkoituksena oli tutkia muun koetoiminnan ohella mahdollisuutta korvata tukiainetta kierrätysmateriaalilla. Kaavio reaktorijärjestelyistä on esitetty tämän raportin liitteenä.

TAULUKKO 15. Koekompostit

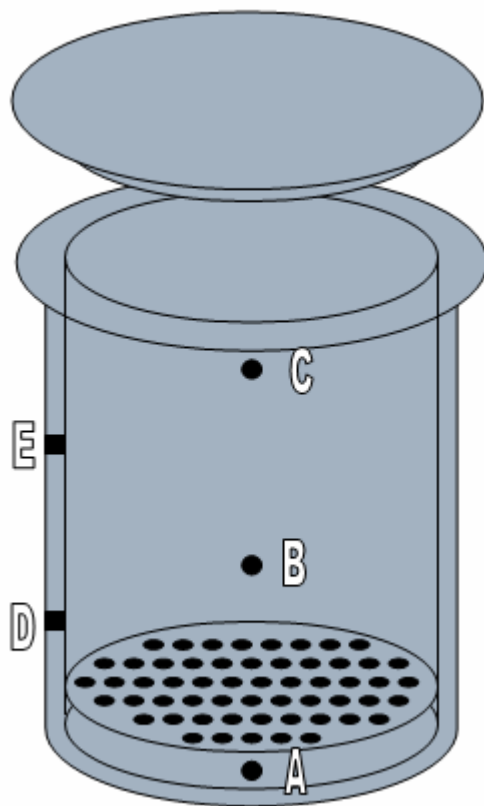
<i>Reaktori</i>	<i>Prosessi</i>	<i>Toiminta</i>
K1 ja K2	Kontrolli	Ei toimenpiteitä
I1 ja I2	Ilmastus	Ilmastuskontrolli
L1 ja L3	Liete	Ilmastus ja tukiaine
L2 ja L4	Liete	Ilmastus ja tukiaine
T1 ja T2	Tuhka	Ilmastus ja tuhka
E1 ja E2	Tuhka ja eriste	Ilmastus, tuhka ja eriste

Ilmastus tapahtui kahdella eri tavalla. Parittomissa reaktoreissa (I1, L1, ..., E1) kompostoitavaan massan sisälle puhallettiin ilmaa koneellisesti sintterin kautta noin 0,5 – 1,0 litraa minuutissa. Parillisista reaktoreista (I2, L2, ..., E2) imettiin ilmaa massan sisältä samalla teholla. Tarkoituksena oli testata onko ilmastusmenetelmällä havaittavaa merkitystä kompostointiprosessin kulkuun. Ilmastus tapahtui läpiviennistä B (Kuvio 16). Molemmille ilmastustavoille käytettiin omia pumppuja ja niiden tehoa säädettiin virtausmittareiden avulla. Ilmavirta jaettiin tasaisesti venttiilien avulla ilmastettaviin komposteihin.

Kompostien alaosaan muodostettiin noin 5 cm korkea ilmatila käyttämällä reiälistä välipohjaa. Tämän tarkoituksena oli estää massan kostuminen liaksi kompostin pohjalla. Reaktorien alimpaan läpivientiin (A) liitettiin suotoveden poistoletkut, joilla massan läpi kulkeutuva neste poistettiin reaktoreista.

Ylimmäinen läpivienti (C) varattiin kaasukromatografian näytteenottoputkelle ja se suljettiin tulpalla mittausten väliajaksi. Reaktorin yläosaan jätettiin noin 5 cm ilmatilaa, jotta kaasunäytettä ei otettaisi kompostimassan sisältä, vaan sen yläpuolelta. Toiseksi alimpaan (D) läpivientiin asennettiin lämpötila-anturit.

Viidettä läpivientiä (E) ei ollut alun perin tarkoitus käyttää, mutta kokeen käynnistyttyä sitä käytettiin ylimääräisten lämpömittareiden sijoitukseen.



KUVIO 16. Reaktoreiden läpiviennit kompostikokeessa

Koe aloitettiin 31.10, jolloin ensimmäinen opiskelijaryhmä sekoitti tukiaineen ja biojätteen sekä annosteli massan komposteihin. Biojäte oli hyvin heterogeenistä sisältäen paljon myös hiilipitoisia ja karkeita jätteitä, kuten lehtiä ja risuja. Suurimmat yksittäiset kappaleet pyrittiin poistamaan massasta ennen reaktoreihin annostelua. Jokaiseen reaktoriin laitettiin noin 15 litraa kompostimassaa, josta puolet oli biojätettä ja puolet tukiainetta.

7.3 Havainnot järjestelmän toiminnasta

Koejärjestelmän perustamisvaiheessa havaittiin, että lämpötilaloggerit eivät toimineet niille varatun kannettavan tietokoneen kanssa, jolloin antureiden ohella jokaiseen kompostiin sijoitettiin tavanomainen lämpömittari läpivientiin E.

Kannettavan tietokoneen tilalle ruvettiin heti etsimään pöytäkoneetta, mutta se saatiin vaihdettua vasta kokeen toisen viikon loppupuolella, jolloin lämpötiloja voitiin alkaa tallentamaan sähköisesti.

Ylimääräiset lämpömittarit sijoitettiin läpivientiin E (Kuvio 17), joka oli kompostimassan yläpinnassa ja varsinaisten lämpötila-antureiden yläpuolella.. Kompostiprosessin edetessä kompostoitava massa painui jopa neljäsosan, jolloin osa lämpömittareista jäi massan yläpuolelle. Tämä aiheutti systemaattisen virheen lämpömittareista luettuihin arvoihin.



KUVIO 17. Lämpömittarit komposteissa

Ilmastuksessa käytettävien pumppujen vikavirtasuojakytkimet eivät kestäneet pumppujen moottorikäytön ja lämpenemisen johdosta syntynyttä virran pientä vuotoa pumppujen runkoon. Tästä seurasi molempien vikavirtasuojakytkinten laukeaminen ensimmäisen 12 tunnin jälkeen, joka katkaisi ilmastuksen kaikista komposteista. Pumppuja ei saatu toimintaan, ennen kuin ne olivat erotettu rakennuksen muusta sähköverkosta suojavirtamuuntajan avulla. Muuntaja esti vikavirtasuojakytkinten laukeamisen pienten moottorikäytössä syntyvien virtapiikkien vuoksi. Kuviossa 18 oleva suojavirtamuuntaja vaihdettiin pienempään kokeen loppupuolella. Ilmastus oli kuitenkin poikki yli 60 tuntia tiistai-keskiviikko välisestä yöstä aina perjantai-iltapäivään saakka. Ilmastuksen katkeaminen havaittiin selkeästi lämpötilojen kasvun ja kompostointiprosessin kehityksen hidastumisena. Lämpötilat lähtivät selkeään nousuun ilmastuksen käynnistyttyä uudestaan.



KUVIO 18. Suojavirtamuuntaja

Reaktoreiden rungot eristivät lämpöä jonkun verran, mutta niistä oli havaittavissa selvästi koska reaktorin sisällä oleva massan lämpötila nousi merkittävästi yli huoneenlämmön. Kahdessa reaktorissa käytettyjen lisäeristeiden vaikutusta reaktorin sisälämpötilaan ei kuitenkaan voitu havaita. Runkomateriaalina toimivan polyeteeni ei sellaisenaan ole kovin hyvä eriste, sen lämmönjohtavuus on noin 0,5 W/mK, joka on noin viisinkertainen puuhun nähden ja lähes yhtä korkea kuin ikkunalasilla.

Lisäksi rungon läpi kulkevat messinkiset kaapelitiivisteet toimivat kylmäsiltoina, ja johtivat lämpöä reaktorin sisältä ulos. Tämä yhdistettynä reaktorin suhteellisen pieneen tilavuuteen piti kompostimassan lämpötilan melko alhaisena. Vastaavia kokeita suoritettaessa voisi olla aiheellista lämmittää tai eristää reaktoreita enemmän.

Ilmastuksen käynnistyttyä ensimmäisen koeviikon lopulla alkoi kompostien toiminta tehostua. Tämä aiheutti hajukaasujen huomattavaa lisääntymistä. Komposteille varattu tila oli selvästi ylipaineinen, josta seurasi hajujen leviäminen kerroksen muihin tiloihin ilmastoinnin ja kulkureittien välityksellä. Tämä oli vähällä aiheuttaa kokeiden ennenaikaisen lopettamisen, mutta ratkaisu löydettiin katkaisemalla kompostointihuoneen tuloilman syöttö, jolloin tilasta syntyi alipaineinen ja suurin osa syntyvistä hajuista siirtyi ilmastoinnin välityksellä suoraan ulos.

Kaasunäytteitä otettiin reaktoreiden ylimmästä läpiviennistä. Kaasun imuun käytettiin samanlaista PVC-letkua kuin ilmastukseen. Letkun sisäpintaan adsorboitui jossain määrin analysoitavia hajukaasuja. Havainto tehtiin, kun suoritettiin ns. nolla-ajaja, jossa imuletkua ei ollut kytketty mitattavaan reaktoriin. Tällöin ei kaasukromatografian olisi pitänyt havaita pitoisuuksia, mutta niitä kuitenkin havaittiin jopa viiden perättäisen nolla-ajon jälkeen. Tämän ilmiön voi välttää vaihtamalla imuletkun ajojen välillä.

Kokeen loppuvaiheessa havaittiin kompostien kuivumista, mikä todennäköisesti johtui liian voimakkaasta ilmastuksesta ja kompostimassan normaalia kuohkeammasta rakenteesta. Tämän vuoksi osaan komposteista lisättiin vettä päivittäisten mittausten yhteydessä. Samalla ilmastuksen tehoa vähennettiin litrasta minuutissa noin 0,5 litraan minuutissa.

Imulla ilmastettujen kompostien ilmastusputkiin kondensoitui heti ensimmäisten vuorokausien aikana merkittävästi vettä. Tämä johtui kompostin lämpenemisestä ja huoneilman lämpötilan laskemisesta öisin. Kondensoitunut vesi aiheutti selkeästi havaittavaa korroosiota venttiileissä. Puhalluspuolella kondensoituneen veden

määrä oli huomattavasti vähäisempi. Vettä kondensoitui huomattavasti myös kompostien kansien sisäpintaan, mikä osaltaan todisti kansien tiiviyyttä.

Komposteista ei valunut suotovesiä kokeen aikana lähes lainkaan. Poistovesien keräysastiaan kertynyt vesimäärä oli koko koejakson aikana yhteensä noin yksi litra, joka pääasiassa oli putkiin kertynyttä kondenssivettä.

7.4 Palaute

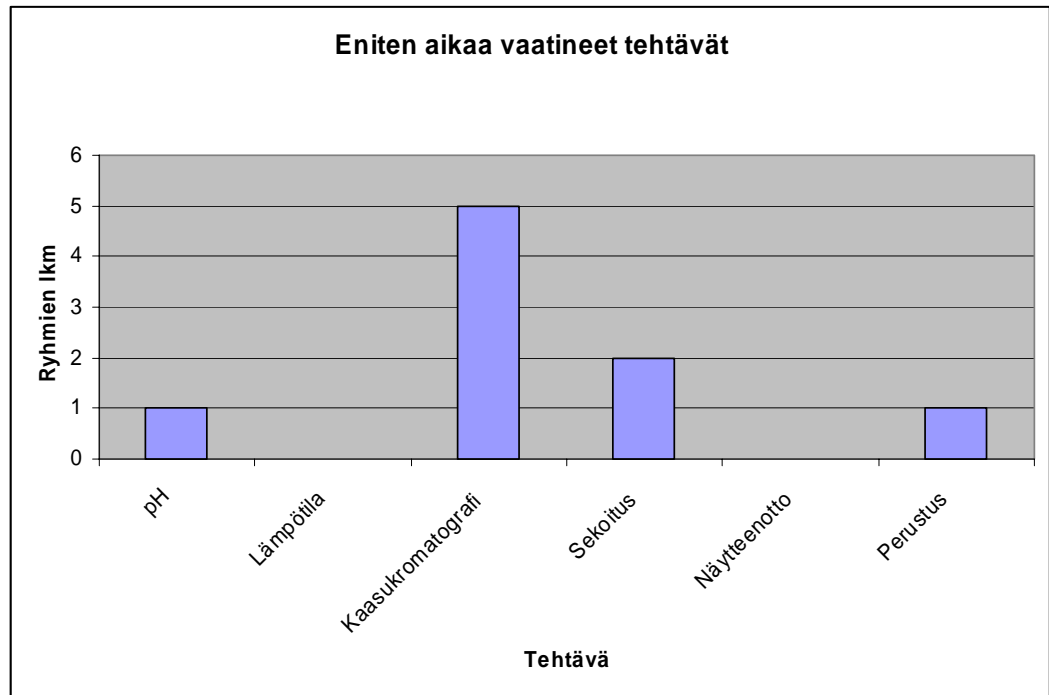
7.4.1 Palautteen kerääminen

Ympäristönsuojelun bioprosessit -opintojaksolle ja kompostikokeen suoritukseen osallistuneilta opiskelijoilta kerättiin ryhmäkohtainen palaute käytännön osuuden yhteydessä. Palaute kerättiin liitteenä 3 olevalla kaavakkeella. Kolmestatoista ryhmästä yksitoista palauttivat lomakkeen määräaikaan mennessä, joten palautekyselyn palautusprosentti oli 85 %. Täten palautetta voidaan pitää hyvinkin suuntaa-antavana. Myös yli 80 % kyselyn eri kohdista oli vastattu, joten senkin osalta vastauksien pitäisi kuvata kohderyhmän mielipiteitä. Kysymykset koskivat lähinnä itse mittaus tapahtumaa, mittausten onnistumista ja ajankäyttöä. Lisäksi ryhmiä pyydettiin antamaan palautetta itse reaktoreiden toiminnasta ja mahdollisista muista sovelluksista, joihin he uskoisivat, että reaktoreita voisi opetuksessa käyttää. Tarkoituksena oli kartoittaa opiskelijoiden halukkuutta osallistua vastaavalaaisiin käytännön harjoituksiin jatkossa. Lisäksi palautetta kerättiin mittauskertojen yhteydessä suullisesti.

7.4.2 Ajankäyttö ja menetelmät

Aikaa käytännön töiden toteuttamiseen oli vastanneilta ryhmiltä kulunut pääasiassa tunnista kahteen tuntia. Ainoastaan ensimmäinen ryhmistä oli käyttänyt aikaa yli kaksi tuntia johtuen kokeiden perustamiseen kuluneesta ylimääräisestä ajasta. Yksi ryhmistä oli suorittanut tehtävänsä alle tunnissa.

Valtaosa ryhmistä oli merkinnyt kaasukromatografian käytön eniten aikaa vieväksi menetelmäksi. Niillä ryhmillä, joiden tehtävänä oli sekoittaa kompostit, oli sekoitus vienyt eniten aikaa verrattuna muihin työtehtäviin. Ryhmien ajankäyttöä on havainnollistettu kuviossa 19.

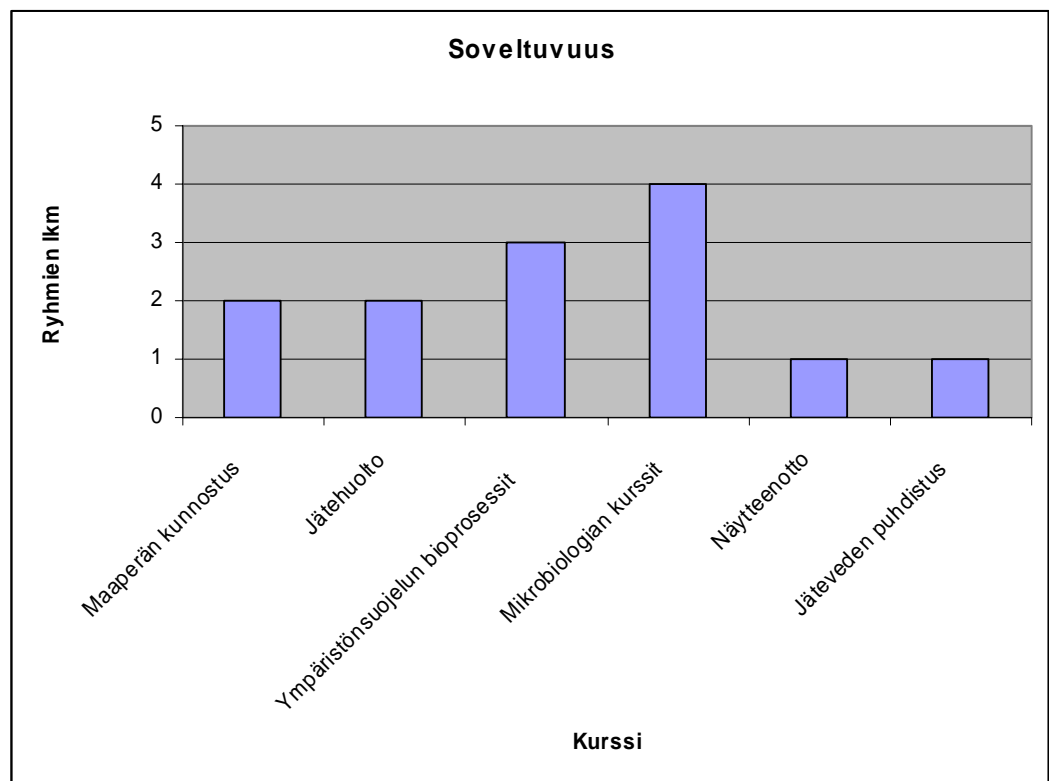


KUVIO 19. Tehtävien ajankäyttö

Mittausmenetelmät tuntuivat puolesta vastanneista ryhmistä täysin luotettavilta. Suurimmaksi yksittäiseksi epävarmuustekijäksi nousi odotetusti lämpötilan mittaaminen, tämä johtui lähinnä ylimääräisistä mittareista ja niiden sijoittelusta ja virheen todennäköisyydestä mittaustuloksissa. Muut mittausmenetelmät, kuten pH ja kaasukromatografia luonnettiin toimiviksi ja luotettaviksi menetelmiksi. Oman toiminnan tarkkuutta ja mittaus- sekä näytteenottorutiinin puutetta epäiltiin myös virheiden mahdolliseksi lähteeksi.

7.4.3 Käytännön suoritus ja soveltaminen

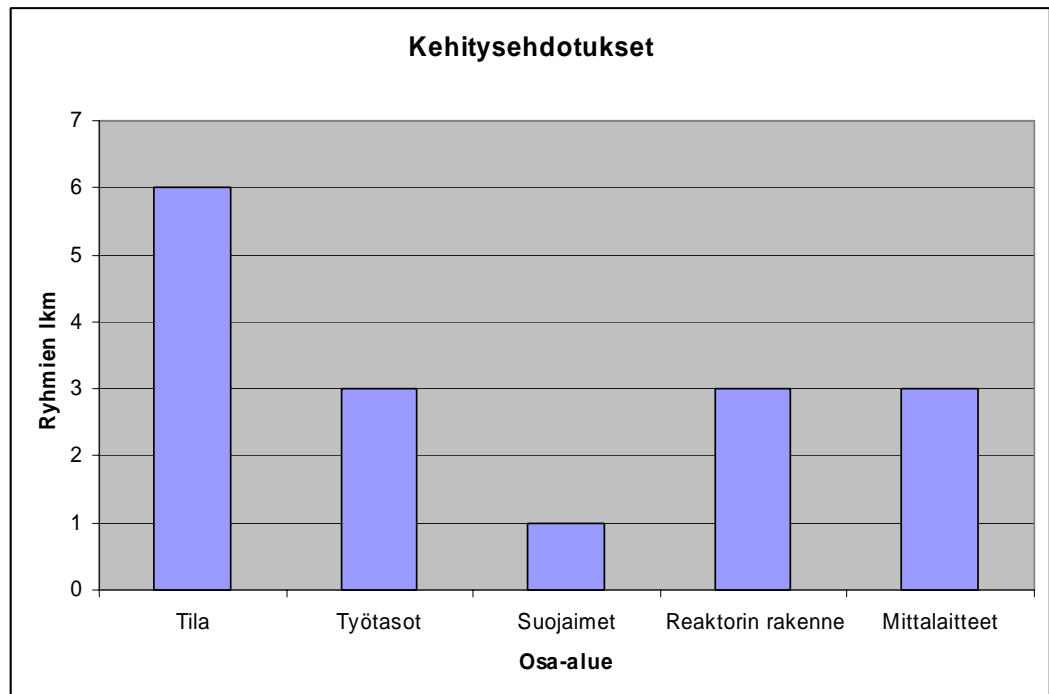
Kaikki palautteeseen vastanneet ryhmät olisivat valmiita suorittamaan samankaltaisia käytännön kokeita jatkossa eri kurssien osalta. Yksittäisiä nimettyjä kurseja ja soveltamisalueita on esitelty kuviossa 20.



KUVIO 20. Reaktoreiden soveltuvuus

7.4.4 Kehitysehdotukset ja muu palaute

Reaktoreihin ei palautteessa tullut kuin yksi kehitysehdotus: sisäsiivilä, jonka sisällä käsiteltävä massa olisi. Tällöin siivilällä voisi nostaa massan helposti reaktorista tyhjennystä tai näytteenottoa varten. Siivilän mahdollisuutta oli pohdittu jo suunnitteluvaiheessa, mutta sen käytössä nähtiin niin paljon ongelmia, ettei sitä toteutettu. Myös läpivientien sijoitus oli osassa palautteesta koettu puutteelliseksi ja niitä toivottiin lisää. Valtaosa kehitysehdotuksista kohdistui kuitenkin itse tilaan, joka koettiin liian pieneksi ja huonosti kalustetuksi. Reaktoreille toivottiin muutamassa palautteessa parempia työtasoja, mikä tuli myös selväksi suullisessa palautteessa ja ryhmien toimintaa seurattaessa. Ehdotuksia on esitetty graafisesti kuviossa 21.



KUVIO 21. Kehitysehdotuksia

Muu palaute käsitteli lähinnä kurssia yleisesti. Viidessä palautteessa todettiin käytännön työn olevan hyvä lisä teoriapainotteiselle opetukselle. Opastus ja työohjeet saivat myös positiivista palautetta. Yhdessä palautteessa toivottiin parempia suojavälineitä, mikä tuli myös ilmi suullisessa palautteessa. Myös tähän osioon oli annettu palautetta ahtaista ja epäkäytännöllisistä tiloista ja työtasoista.

7.5 Suoritetut mittaukset ja analyysit

7.5.1 Tuloksista yleisesti

Vaikka kompostikokeen pääasiallisena tarkoituksena oli reaktorien testaaminen opetuskäytössä ja mahdollisten rakenteellisten vikojen etsiminen sekä havaintojen tekeminen, seurattiin kurssin aikana myös kompostien toimintaa mittaamalla useita kompostin toimintaan liittyviä parametreja. Mittaus- ja analyysimenetelmät ovat esitetty seuraavissa kappaleissa, mutta niiden tuloksia ei ole katsottu tarpeelliseksi raportoida niiden yleisluontoisuuden vuoksi.

Ympäristönsuojelutekniikan bioprosessit opintojaksolle osallistuneet opiskelijat mittasivat lämpötilan, pH:n ja kaasut suoraan reaktoreista päivittäin. Maahengitys, typpi ja mikrobimäärät analysoitiin komposteista otetuista näytteistä ympäristöbiotekniikan projektityöt –opintojakson opiskelijoiden toimesta. Tuloksia esiteltiin opintojaksojen päättöseminaaritalaisuudessa marraskuun 2006 lopussa.

7.5.2 Reaktoreista mitatut parametrit

Lämpötilaa mitattiin kokeen alussa perinteisillä lämpömittareilla ja kokeen lopussa toimintaan saaduilla lämpötila-antureilla. Mittareiden lukemia kirjattiin ylös päivittäin mittausvuorossa olevan opiskelijaryhmän toimesta. Antureiden toimies- sa lämpötiloja tallennettiin jatkuvatoimisesti.

Tavanomaisten lämpömittareiden lukemissa havaittiin selkeä virhe kompostimassan painumisen ja mittareiden sijoittelun vuoksi. Virheen suuruutta ei voitu tarkkaan arvioida, mutta sen oletettiin olevan useita asteita. Lämpötila-antureiden sijoittelu oli huomattavasti parempi, ja lämpötilat olivat korkeampia kuin tavanomaisten lämpömittareiden ilmoittamat.

pH mitattiin reaktoreista läpiviennin tai kannen kautta jokaisena arkipäivänä. Mittari kalibroitiin päivittäin ja puhdistettiin aina reaktoreiden välillä. Mittaukset pyrittiin suorittamaan aina massan keskiosasta, mutta ne silti edustivat hyvin paikallista tilaa reaktorissa. Tämä havaittiin varsin suurina mittaustulosten heilailuksina jopa peräkkäisistä mittauksista samasta reaktorista mittarin osuessa hieman eri kohtaan kompostoitavassa massassa. Tämä oli kuitenkin odotettavissa lähtöaineen heterogeenisuuden vuoksi. pH:n vaihtelut tasaantuivat nopeasti kompostointiprosessin edetessä.

Kompostikaasuja mitattiin Lahden ammattikorkeakoulun Photovac Voyager (GC-PID) kannettavalla kaasukromatografilla. Mittauksissa havaittiin noin 20 erilaista yhdistettä, joista 15 tunnistettiin. Taulukossa 16 on esitetty muutamia kompostointiprosessissa esiintyviä kaasuja ja niiden hajukynnyksiä.

TAULUKKO 16. Kaasujen hajukynnyksiä (VTT)

<i>Yhdiste</i>	<i>Hajukynnys PPM</i>	<i>Hajun laatu</i>
Asetoni	15	Kemikaalimainen, makea
Etanoli	30	Makea
MEK	8	Hieman terävä, mintunomainen
MeSH	0,001	Makea, mätä
DMS	0,0004 – 0,01	Kaali
Butanaali	1	Pistävä, katkera
Etyyliaset.	2,7	Ananas

Mittaustulokset ovat hyvin puutteellisia, sillä kurssin aikataulun puitteissa ei ehditty analysoida jokaisen kooreaktorin kaasuja päivittäin. Kappaleessa 6.3 esitetty havainto hajukaasujen adsorboitumisesta kaasukromatografian näytteenottoletkuun vaikutti selvästi havaittuihin kaasupitoisuuksiin. Tästä johtuen kaasukromatografian tuloksia voidaankin pitää ainoastaan kvalitatiivisina.

Jatkossa tulee pyrkiä mittaamaan tasaisia sarjoja, jolloin tuloksista saisi helpommin tulkittavia. Kaasukromatografian käyttö vaati kompostin hajukaasuja mitattaessa noin 10 minuuttia ajoa kohden, jolloin kaikkien reaktoreiden mittauksessa olisi kulunut noin kaksi tuntia. Tämä lisättynä muihin mittauksiin olisi kasvattanut opiskelijaryhmien työaika merkittävästi.

7.5.3 Laboratorioanalyysit

Maahengityksen mittasivat Juha-Pekka Sura ja Terhi Uski Lahden ammattikorkeakoulun ympäristöbiotekniikan suuntautumisvaihtoehdosta. Työ suoritettiin osana ympäristöbiotekniikan projektityöt –opintojaksoa. Varsinainen mittaus tapahtui komposteista kerätyistä näytteistä Lahden tiede- ja yrityspuiston opetuslaboratoriossa.

Mittaukseen käytettiin OxiTop® -menetelmää, jossa näytteessä tapahtuva biologinen hajoaminen muodostaa astiassa paine-eron ja tätä kautta voidaan määrittää syntyneen hiilidioksidin määrä suhteessa aikaan ja näytemäärään. Luku kertoo kuinka aktiivista biologista toimintaa näytteessä tapahtuu. Mittaukset suoritettiin kokeen alku-, keski- ja loppuvaiheen näytteistä yhdistämällä rinnakkaisten reaktoreiden näytteet.

Typen määrittämisen suorittivat Teija Laakso ja Johanna Nikama Lahden ammattikorkeakoulun ympäristöbiotekniikan projektityöt kurssilla. Määrittäminen tapahtui nitraatti- ja ammoniumtyppiliuskoilla, jotka olivat ensimmäistä kertaa käytössä ja määrittäminen oli lähinnä kokeellista, vaikka tulokset tuntuivat luotettavilta. Määrittäminen tehtiin kahdeksan päivän näytteistä koko koejakson ajalta.

Komposteista otetuista näytteistä määritettiin myös **mikrobimäärät** maljaamalla näytteitä Lahden tiede- ja yrityspuiston tiloissa. Määrittämisen suorittivat ympäristöbiotekniikan projektityöt –kurssin opiskelijat Janika Kuusenaho ja Hanna Puttonen. Määrittämiset perustuivat mikrobipesäkkeiden silmämääräiseen laskemiseen kasvatusmaljoilta, joihin laimennettua kompostinäytettä oli levitetty.

7.6 Yhteenveto

Kompostikoe oli tarkoitettu pääasiassa reaktoreiden ja oheislaitteiden testaukseen sekä puutteiden ja vikojen löytämiseen. Vikoja ja ongelmia löytyikin, mutta ne saatiin kaikki korjattua, joten koe oli sen puolesta onnistunut.

Kompostoinnin varsinaiset tulokset olivat tämän opinnäytetyön kannalta sivuseikka, mutta niitäkin saatiin. Mittaukset ja analyysit niin reaktoreista kuin laboratoriossa tuottivat tulosta ja kompostien tilaa saatiin kattavasti seurattua koko kokeen ajan. Seminaaritalaisuudessa esitellyt mittausmenetelmät ja tulokset eri analyysistä antoivat kuvan bioprosessien käytännön seuraamisesta ja raportoinnista. Varsinainen kompostiprosessi ei mittauksen perusteella lähtenyt juurikaan liikkeelle, mikä pääasiassa johtui kokeen alkuvaiheen ongelmista ilmaston suhteen.

Koe antoi lisäksi arvokasta palautetta ja kokemuksia tämän kaltaisten kurssien käytännön järjestämisestä suurempien oppilasryhmien kanssa. Huolellinen valmistelu ja suunnittelu tulee ottaa huomioon tulevaisuudessa vastaavia kokeita järjestettäessä. Myös opiskelijoiden ottaminen mukaan suunnittelu- ja rakennusvaiheeseen tuo uusia ideoita ja mahdollistaa enemmän käytännön oppimista, kuin valmiin järjestelmän käyttö ja siitä suoritettavat mittaukset.

8 TESTAUS 2: TIIVEYSKOE

8.1 Toteutus

Kooreaktoreiden tiiveyttä testattiin kompostikokeen jälkeen reaktoreita puhdistettaessa. Koe toteutettiin Lahden ammattikorkeakoulun tiloissa aikavälillä 1.12.–3.12.2006.

Kokeessa käytettiin viittä kooreaktoria, jotka täytettiin ylimpään läpivientiin asti vedellä. Läpivienneistä kolme suljettiin kaapelitiivisteiden omalla tulpalla ja kaksi tiivistettiin mm. kompostikokeiden ilmastuksessa käytetyllä muoviletkulla. Reaktoreita tarkkailtiin täytön yhteydessä ja välittömästi täytön jälkeen. Tämän lisäksi reaktoreiden tila tarkastettiin koejärjestelyjä purettaessa kahden vuorokauden kulluttua aloituksesta.

8.2 Tulokset ja havainnot

Viidestä kooreaktorista kaikki vuotivat heti täytön jälkeen, kun vettä oli reaktorissa noin 20 litraa. Vuodot tapahtuivat pääasiassa tulpan ja kaapelitiivisteiden välistä. Kaapelitiivisteiden ja itse reaktorin rungon välistä ei tapahtunut vuotoa tai sitä ei voitu erottaa tulpan kautta tapahtuvasta vuodosta. Vuodon määrät vaihtelivat hiekan reaktoreissa, mutta keskimäärin ensimmäisten minuuttien aikana täytön jälkeen vuodot olivat kooltaan noin kuutiosenttimetri sekunnissa. Kaapelitiivisteiden omat tulpat vuosisivat selkeästi enemmän kuin muoviletkusta valmistetut tulpat. Veden pinnan korkeuden alentuessa vuodot vähenivät hydrostaattisen paineen alentuessa reaktorissa.

Viikonlopun jälkeen kooreaktoreista neljässä vedenpinta oli laskenut noin 5 cm korkeudelle pohjasta ja vuotoa ei enää tapahtunut alimmasta läpiviennistä, joka vielä oli vedenpinnan alapuolella.

Yhdessä reaktoreista vedenpinta oli pysähtynyt noin reaktorin keskitasolle keskimmäisen läpiviennin kohdalle. Tässä reaktorissa ei siis tapahtunut vuotoa kahdessa alimmaisessa läpiviennissä, joista molemmat olivat tiivistetty kaapelitiivisteiden omalla tulpalla.

Koska reaktoreita ei seurattu koko kokeen ajan, on mahdotonta täysin varmasti sanoa, kuinka nopeasti neljä eniten vuotanutta reaktoria olivat tyhjentyneet. Alussa tarkkaillun vuodon perusteella voidaan arvioida, että aikaa olisi kulunut noin viidestä kymmeneen tuntia.

8.3 Johtopäätökset

Tuloksista voidaan päätellä, että kaapelitiivisteiden ja rungon välinen liitântä on sellaisenaan hyvin tiivis. Pientä vuotoa todennäköisesti tapahtuu joidenkin tiivisteiden välistä, mutta sillä ei pitäisi olla merkitystä reaktoreissa suoritettavien prosessien toiminnalle. Tulpan ja kaapelitiivisteiden välinen liitos ei kuitenkaan ole tarpeeksi pitävä. Putken ja kaapelitiivisteiden välinen liitos pitää vettä paremmin hieman joustavan putken ansiosta, mutta kova tulppa ja pehmeä tiivisteiden O-rengas eivät toimi samalla tavoin.

Läpivientien tiivistys tulee tehdä huolella ennen kokeen aloittamista, varsinkin jos kyseessä on täysin nesteessä tapahtuva prosessi. Tiiveyttä voidaan parantaa esimerkiksi päällystämällä kaapelitiivisteiden omat tulpat putkitekniikalla tai erillisellä kumitiivisteellä. Myös silikonilla tai putkikitillä saadaan aikaan pitävät liitokset, mutta tällöin ei läpivientä voi juurikaan avata kokeen aikana menettämättä osaa tiiveydestä.

9 TESTAUS 3: MAAMASSAN PUHDISTUS

9.1 Toteutus ja tarkoitus

Koe toteutettiin Lahden ammattikorkeakoulun Biologiset kunnostusmenetelmät – opintojakson osana Lahden ammattikorkeakoulun tiloissa aikavälillä 17.1.-8.3.2007. Kurssille osallistuneet ympäristöbiotekniikan opiskelijat suunnittelivat ja toteuttivat koereaktoreilla puhdistuskokeen, jonka toimintaa seurattiin näytteenotoin.

Testauksessa pyrittiin selvittämään koereaktoreiden soveltumista maaperän biologisten puhdistusten mallintamiseen. Lisäksi testauksen avulla pyrittiin kehittämään näytteenottoa reaktoreista sekä suunnittelemaan toimiva nesteen kierrätysjärjestelmä reaktorien välille. Koe tarjosi mahdollisuuden seurata opiskelijoiden toimintaa pienemmässä opetusryhmässä verrattuna ensimmäisen kokeen suureen osallistujamäärään.

Kokeellisena tarkoituksena oli puhdistaa maanpesuprosessista syntyvää öljypitoista suotopuristinsakkaa mikrobitoiminnan avulla. Koejärjestely oli samankaltainen kuin Johanna Rikkisen opinnäytetyössä toteutettu koe, jossa testattiin elektroosmoosin soveltamista suotopuristinsakan puhdistukseen. Erona olivat muun muassa uudet koereaktorit, erilainen puskuriliuoksen kierrätysjärjestelmä sekä elektroniakseptori, joka Rikkisen kokeessa oli happi.

9.2 Koejärjestelyt

Öljyllä pilaantunutta maata puhdistetaan koejärjestelyssä kolmella erilaisella prosessilla, joista jokaisesta suoritetaan rinnakkainen koe. Yhteensä kokeessa käytettiin seitsemää reaktoria, joista kahteen rakennettiin järjestelmä, jossa puhdistusprosessia kiihdytettiin elektrokineetiikan ja nesteen kierrätyksen avulla. Yksi reaktoreista toimi kierrätettävän puskuriliuoksen keräysastianä.

Kooreaktoreihin annosteltiin 14 litraa voimakkaasti öljyllä pilaantunutta suotopuristinsakkaa. Sakka annosteltiin välipohjalevyn päälle, jolloin sakan alle jäi hie- man ilmatilaa. Tällöin sakan kasteluun käytetty puskuriliuos ei kerääntynyt mas- san pohjalle vaan valui tasaisesti ulos massasta muodostaen homogeeniset olosuh- teet koko reaktorin tilavuuteen. Kasteluun käytetty puskuriliuos sisälsi typpeä ja fosforia hajottajamikrobeille. Tämän lisäksi puskurissa käytettiin elektroniaksep- torina rautaa rautakloridin (FeCl_3) muodossa. Rautakloridi toimii hapen korvaaja- na reaktorissa, jolloin prosessia ei tarvitse ilmastaa. Neljään reaktoriin annosteltiin puskurin seassa myös pinta-aktiivisuutta alentavaa ainetta, joka mobilisoi maapar- tikkeleista öljy-yhdisteitä ja toimitti ne siten paremmin mikrobien saataville. Pus- kuria annosteltiin jokaiseen reaktoriin kokeiden alkaessa 3 litraa, jolloin koko massa kostui, mutta ei liettynyt. Koejärjestelyt rinnakkaisine reaktoreineen on esitetty taulukossa 17.

TAULUKKO 17. Maaperän puhdistuksen koejärjestely

<i>Reaktori</i>	<i>Pinta-aktiivinen aine</i>	<i>Rauta</i>	<i>Typpi</i>	<i>Fosfori</i>	<i>Sekoitus</i>	<i>Sähkö</i>	<i>Nesteen kierto</i>
1	x	x	x	x	x		
2	x	x	x	x	x		
3	x	x	x	x		x	x
4	x	x	x	x		x	x
5		x	x	x	x		
6		x	x	x	x		

Reaktorit 1 ja 2, 3 ja 4 sekä 5 ja 6 olivat rinnakkaisia toisilleen sisältäen samanlai- set koeolosuhteet.

Reaktoreissa 3 ja 4 massan sekoituksen sijaan käytettiin nesteen kierrätystä. Tämä tapahtui liitteenä 2 esitetyn järjestelmän avulla, jossa reaktorin pohjalle valuva puskuriliuos kulkeutui takaisin keräysastiaan, josta se automaattisesti nostettiin takaisin reaktoreiden yläosaan kerran vuorokaudessa. Nesteen kierrättäminen ta- pahtui Lahden ammattikorkeakoulun kemian laboratoriosta lainatulla KNF N86 KN.18 Laboport –vakuumipumpulla (Kuvio 22) . Pumpun teho on 65 W ja se

pystyy kierrättämään noin 6 litraa nestettä minuutissa. Virtaus säädettiin kokeen alussa virtausmittarin avulla noin litraan minuutissa.



KUVIO 22. KNF N86 KN.18 Laboport -vakuumipumppu

Pumpun imuletku liitettiin keräyssäiliöön, johon oli lisätty muutama litra puskuria, jottei kierrätettävä neste loppuisi kokeen aikana. Pumpun ulostuloletku jaettiin kahteen reaktoriin, ja pumppu säädettiin käynnistymään kerran vuorokaudessa viideksitoista minuutiksi. Teoriassa siis kierrätettävää nestettä pumpattiin yhteen reaktoriin noin 7,5 litraa. Käytännössä pumpulle syntyvä vastus kuitenkin hidasti virtausta niin paljon, että kierrätettävän nesteen määrä oli noin 3 litraa vuorokaudessa. Lisäksi ei voitu tarkasti määrittää kulkeutuiko nestettä sama määrä molempiin reaktoreihin, mutta silmämääräisesti arvioiden molemmista reaktoreista palautuvan nesteen määrä oli suunnilleen samaa luokkaa.

Neste levitettiin suotopuristinsakan pinnalle kurssille osallistuneiden opiskelijoiden suunnitteleamalla levitysletkulla, johon oli tasaisin välein puhkottu pieniä reikiä. Letku kierrettiin kulkemaan reaktorin sisällä siten, että neste leviäisi mahdollisimman tasaisesti koko massan pinnalle.

Nesteen kierrätyksen ohella reaktoreissa 3 ja 4 käytettiin elektrokineettistä menetelmää tehostamaan biologista puhdistusta. Sähkön vaikutuksesta ravinteet, neste

ja puhdistettava haitta-aine kulkeutuvat paremmin mikrobin saataville ja parantaa täten puhdistustehoa. Lisäksi suotopuristinsakan läpi kulkeva sähkövirta lämmittää massaa ja näin ollen vaikuttaa mikrobin aineenvaihduntaan ja täten myös haitta-aineen hajoamiseen.

Elektrokineettinen järjestelmä rakennettiin sijoittamalla puhdistettavan massan ylä- ja alapinnalle kuvion 23 mukainen teräsverkko elektrodeiksi. Verkon silmäkoko oli noin 5 cm ja paksuus noin 5 mm. Elektrodit kiinnitettiin sähköjohtimilla virtalähteeseen siten, että alempi elektrodi varautui negatiivisesti ja ylempi positiivisesti. Käytetty jännite oli noin 30 V.



KUVIO 23. Elektrodiverkko

9.3 Havainnot

Tiiveyskokeessa havaitut vuodot toistuivat, kun puskuria annosteltiin kokeiden alussa kerralla suuria määriä reaktoreihin. Tästä aiheutui vuotoja lähes jokaisesta läpiviennistä. Vaikutus koetuloksiin ei ole olennainen, mutta käyttömukavuuteen ja tilan siisteyteen kuitenkin merkittävä. Vuodot tapahtuivat pääasiassa ensimmäisen puskurin lisäyksen yhteydessä, jolloin reaktoreista 1, 2, 5 ja 6 valui huomattavasti nestettä alimman läpiviennin kautta. Nestettä kierrätettäessä reaktoreihin 3 ja 4 tapahtui pieniä vuotoja myös putkien liitoksista, jotka kuitenkin saatiin loppumaan sijoittamalla putket oikeaan asentoon.

Myös reaktorit 3 ja 4 vuosisivat nesteen lisäyksen yhteydessä, mutta se väheni huomattavasti kokeen edetessä johtuen epäpuhtauksista, jotka tukkivat vuotokohdat.

Nesteen palautuminen keräysastiaan onnistui alun vaikeuksien jälkeen hyvin. Palautusletkujen tulee olla keräysastian nesteen pinnan yläpuolella, jotta paine-ero imee korkeammalla olevien koereaktoreiden pohjalta veden keräysastiaan.

Sähkövirta lämmitti reaktoreita 3 ja 4 huomattavasti kokeen alussa. Reaktoreihin ei ollut sijoitettu lämpömittareita, mutta reaktorin ulkopinta oli huomattavasti huoneenlämpöä korkeampi, jolloin reaktorin sisällä lämpötilat saattoivat olla jopa yli 50 °C. Kokeen edetessä sähkövirta pieneni ja myös reaktoreiden lämpötila laski.

Kastelun ja virran yhteys oli selkeästi havaittavissa massan läpi kulkevan virran moninkertaistuessa lyhyessä ajassa kastelun alkaessa. Virran suuruus oli enimmillään 0,8 ampeeria kastelun aikana, kun se kuivassa reaktorissa oli alle 0,1 ampeeria.

Ensimmäinen ongelma puskurien kierrätyksessä havaittiin noin viikon kuluttua, kun reaktorin 4 läpi kulkeva sähkövirta poikkesi suuresti reaktorin 3 läpi kulkevasta virrasta. Tällöin puskurin kierrätystä ruvettiin tarkastelemaan lähemmin ja

havaittiin, että reaktoreihin puskuria kierrättävä pumppu ei enää jaksanut nostaa liuosta keräyssäiliöstä. Ongelma levisi nopeasti molempiin reaktoreihin ja sitä yritettiin korjata puhdistamalla kastelujärjestelmää. Tämä ei kuitenkaan auttanut, joten kastelujärjestelmä poistettiin kokonaan, jolloin pumpulle ei syntyisi niin suurta vastapainetta. Myös keräyssäiliö nostettiin lähemmäs reaktoreiden tasoa, jolloin nostokorkeus pieneni. Lisäksi pumppu puhdistettiin ja osaa letkuista lyhennettiin. Toimenpiteet eivät kuitenkaan parantaneet merkittävästi puskurin kierrätystä. Jotta kokeet saatiin pysymään toiminnassa, lainattiin Helsingin Yliopiston ympäristöekologian laitokselta nestepumppu. Nestepumppu ja käytössä ollut vaakuumpumppu kytkettiin sarjaan, jolloin pumppujen yhdistetty teho riitti kierrättämään sakkaista puskuriliuosta takaisin reaktoreihin.

Kokeita purettaessa 8.3.2007 havaittiin, että reaktoreissa 3 ja 4 anodeina toimineet teräsverkot olivat syöpyneet pahasti. Reaktorissa 3 sähköjohdin oli täysin irti elektrodista. Syöpyminen aiheutti sähkövirran heikkenemistä reaktoreissa ja se varmasti vaikutti myös puhdistustehoon. Ongelma oli sama kuin aikaisemmissa elektrokineettisissä kokeissa (Malinen 2006, Rikkinen 2006) ja sitä voitaisiin vähentää käyttämällä kestävämpiä elektrodeja tai vaihtamalla elektrodit uusiin kokeen aikana.

8.4 Palaute ja tulokset

Biologiset kunnostusmenetelmät –opintojaksolle osallistui 6 ympäristöbiotekniikan opiskelijaa. Palautetta kerättiin suullisesti koejärjestelyjen rakentamisvaiheessa sekä mittaus- ja näytteenottokerroilla. Opiskelijat suunnittelivat ja rakensivat omatoimisesti koejärjestelyt, mikä koettiin hyvänä ratkaisuna. Rakennusvaiheessa opiskelijat saivat paremman kuvan siitä, miten prosessi toimii, toisin kuin tilanteessa, jossa he olisivat suorittaneet vain mittauksia valmiiksi rakennetusta järjestelmästä. Opiskelijoiden omatoimisen suunnittelun ja rakentamisen mahdollisti osaltaan hyvin pieni ryhmäkoko. Suuremmilla ryhmillä tilojen koko ja ajankäyttö asettavat rajoituksia.

Reaktoreista otettiin näytteitä kerran viikossa, jolloin samalla osaa reaktoreista sekoitettiin. Näytteenoton ja sekoituksen suoritti aina kaksi opiskelijaa kerrallaan ja aikaa siihen kului noin puolitoista tuntia. Vaikka näytteenotto ja sekoitus olivat melko raskaat operaatiot, ei niitä pidetty epämieluisina, vaan mielenkiintoisena vaihteluna muuten teoreettispainoiselle opiskelulle. Näytteenotto suoritettiin pareittain, jolloin kompostikokeissa ahtaiksi osoittautuneet tilat olivat välttävät. Myös käytettyjen koereaktoreiden pienempi määrä toi lisää työskentelytilaa.

Maaperän puhdistuksen tulokset eivät ehtineet valmistua tämän opinnäytetyön kirjoitusvaiheessa. Kokeet lopetettiin 8.3.2007, jonka jälkeen näytteistä analysoitiin kaasukromatografisesti hiilivety- ja öljypitoisuudet. Tulokset eivät kuitenkaan ole olennaisia tämän opinnäytetyön kannalta, koska testauksen pääasia oli reaktoreiden toimivuuden testaaminen maaperänpuhdistusprosessissa ja käyttö opetustilanteessa.

9.5 Päätelmät

Koejärjestelmän suunnittelu ja rakentaminen onnistuivat erinomaisesti. Opiskelijoilla oli vapaat kädet rakentaa järjestelmä olemassa olevia resursseja käyttäen, jotka olivat aika rajatut varsinkin kastelujärjestelmää suunniteltaessa. Järjestelmä saatiin rakennettua ja se toimi varsin moitteettomasti ensimmäiset kaksi viikkoa, sekoitukset ja näytteenotot onnistuivat suunnitelman mukaisesti. Kastelujärjestelmän tukkeutuminen kokeen toisen viikon aikana oli valitettavaa, muttei yllättävää. Tämä toi kuitenkin arvokkaita käyttökokemuksia siitä, mitä on seuraavalla kerralla otettava huomioon. Korjaus onnistui opiskelijavoimin, ja järjestelmä saatiin palautettua toimintaan. Reaktorien tiiveys ei osoittautunut niin suureksi ongelmaksi kuin alussa oli ajateltu. Vähäiset vuodot tukkeutuivat itsestään kokeen edetessä. Tämä ei kuitenkaan poista vuotojen aiheuttamaa ongelmaa, vaan se tulee edelleen ottaa tarkasti huomioon nestemäisiä prosesseja suunniteltaessa. Reaktorien rungot kestivät kokeen rasitukset hyvin, ainoastaan välipohjalevyt taipuvat hieman raskaan maamassan ja sekoituksien vuoksi. Paksummat pohjalevyt on syytä hankkia samankaltaisten kokeiden varalle.

10 HANKKEEN YHTEENVETO

10.1 Jatkotoimenpiteitä ja kehitysehdotuksia

Reaktoreiden suunnittelun ja testauksen yhteydessä esille tulleita toteutumattomia ideoita ja kehitysehdotuksia olivat muun muassa reaktoreiden lämmitys ja jäähdytys, mekaaninen sekoitus ja lisäinstrumentointi.

Jatkotutkimusta ja kehittelyä vaativat myös reaktoreiden tiiveys, joka on tällä hetkellä vain välttävä ja aiheuttanee ongelmia nestemäisiä prosesseja mallinnettaessa. Kuitenkin ongelma on tiedostettu ja ottamalla tiiveys tarkemmin huomioon koejärjestelyjä rakennettaessa voidaan vuotoja ehkäistä.

Lämmitystä ja jäähdytystä olisi voitu testata nykyisilläkin välineillä, mutta aikaa tällaisen kokeen järjestämiseen ei ollut. Mekaaninen sekoitus tarvitsee reaktoreiden kannen muokkausta ja erilliset moottorit, mutta se ei ole investointina kovin kallis. Mekaanista sekoitusta ei kuitenkaan tarvita ympäristön bioprosessien mallintamisessa niin paljoa kuin tuotannollisissa prosesseissa. Lähinnä muutamit nesteessä tapahtuvat prosessit, kuten jäteveden käsittely voivat vaatia sekoitusta, jota ei voida ilmastamalla toteuttaa. Täten mekaanisen sekoituksen rakentaminen ei vielä ole ajankohtaista.

Lisäinstrumentointi on kallein, joskin merkittävin osa reaktoreiden jatkokehitystä erityisesti tutkimuskäyttöä ajatellen. Tällä hetkellä ainoa online-mittaus on lämpötila, jonka lisäksi muita helppoja ja suhteellisen halpoja mittauksia olisivat pH, kosteus ja liuennut happi, jotka voitaisiin toteuttaa reaktoreihin samalla periaatteella kuin nykyiset mittaukset. Näitä mittauksia voitiin kuitenkin toteuttaa nykyisilläkin mittalaitteilla ja laboratorioanalyysillä, joten mitään uutta informaatiota ne eivät toisi reaktoreissa tapahtuvien prosessien tilasta.

Näytteenottomahdollisuudet reaktoreista ovat testausten perusteella riittävät, joskin reaktoreihin sopivia näytteenottimia tulee kehittää lisää. Uusien läpivientien tekeminen runkoihin onnistuu, jos lisäinstrumentointi tai näytteenotto sitä vaatii.

Ympäristötekniikan laboratoriotilojen laajentaminen ei varsinaisesti kuulu tämän projektin jatkotoimenpiteisiin, mutta se mahdollistaisi reaktoreiden paremman sijoittelun ja helpottaisi työskentelyä suurempien opiskelijaryhmien kanssa.

10.2 Hankkeen lopputulokset

Hankkeen tuloksena syntyi kaksitoista koereaktoria, jotka varusteltiin käytännön kokeita silmällä pitäen. Reaktoreita testattiin kahdella Lahden ammattikorkeakoulun Tekniikan laitoksen ympäristötekniikan opintojaksolla, josta saatiin käytännön kokemuksia sekä reaktoreiden toiminnasta, että käytännön töiden toteuttamisesta Tekniikan laitoksen tiloissa. Samalla voitiin tutkia eri mittauslaitteiden yhteensopivuutta reaktoreiden kanssa ja erilaisia näytteenottomenetelmiä.

Suunnitteluvaiheessa painotettiin reaktorien monikäyttöisyyttä sekä kattavaa instrumentointi- ja mittausmahdollisuuksia, mikä voidaan todeta toteutuneen reaktoreiden koekäytössä. Myös erilaisista kytkennöistä ja oheislaitteiden käytöstä reaktoreiden kanssa saatiin runsaasti käyttökokemuksia, mikä helpottaa uusien kokeiden suunnittelua ja toteutusta. Kokeet osoittivat myös reaktorirunkojen kestävästi hyvin niin mekaanista kuin kemiallistakin kulutusta, mikä oli yksi suunnittelun lähtökohdista. Kaiken kaikkiaan suunnitteluvaiheessa esitettyihin haasteisiin pystyttiin vastaamaan vähintäänkin tyydyttävästi.

Reaktorien runkojen käyttöäksi voidaan arvioida useita vuosia niin opetus- kuin tutkimuskäytössäkin. Tämä suhteutettuna varsin nimellisiin kustannuksiin niin rakennus-, kuin käyttövaiheessa tuo toivottavasti uusia mahdollisuuksia ympäristötekniikan opetustarjontaan. Tutkimuskäyttöä reaktoreille tulee toivottavasti opiskelijoiden opinnäytetöiden yhteydessä, jolloin reaktoreilla voidaan mallintaa ja testata erilaisia puhdistus- tai käsittelymenetelmiä.

Tässä opinnäytetyössä esitetyt tiedot niin reaktoreiden fyysisestä rakenteesta, oheislaitteista ja niiden sovelluksesta testausmenettelyihin toimivat alustavana käytännön ohjeena reaktoreiden jatkokäytölle ja kehitykselle. Lisäksi suunnittelu- ja testausvaiheessa tehdyt valinnat, havainnot ja päätelmät voivat auttaa vastaavien reaktoreiden suunnittelussa ja käytössä.

LÄHTEET

- Aittomäki, E., Eerikäinen, T., Leisola, M., Ojamo, H., Suominen, I., Weymarn, N. 2002. Bioprosessitekniikka. WS Bookwell Oy, Porvoo.
- Albers, M., Helle, H., Varpula, T., Itävaara, M., Kapanen, A., Vikman, M. 2003. Kompostointiprosessin monitorointi ja ohjaus. VTT Kirjallisuusselvitys, Espoo.
- Grady, L., Lim, H. 1980. Biological wastewater treatment – Theory and applications s. 3-9. Marcel Dekker, New York.
- Itävaara, M., Vikman, M., Kapanen, A., Venelampi, O., Vuorinen, A. 2006. Kompostin kypsyytestit. VTT Kirjallisuusselvitys, Espoo.
- Järvinen, K. 2001. Bioreaktoriprosessi kloorifenoleilla pilaantuneen pohjaveden puhdistuksessa –Kärkölä-. Edita Oyj, Helsinki.
- Järvinen, P. 2000. Muovin suomalainen käsikirja. WS Bookwell Oy, Porvoo.
- Laukkanen, T. 2006. Ympäristönsuojelun bioprosessit. Luentomateriaali. Lahden ammattikorkeakoulu, Lahti.
- Laukkanen, T., Hartikainen, T., Kostia, S., Rautio, M. 2003. Ympäristönsuojelun biotekniikka. Mikkelin ammattikorkeakoulu, Mikkeli.
- Malinen, E. 2006. Kreosotilla pilaantuneen maan biologinen puhdistaminen elektrokineetiikalla tehostettuna. Insinööriyö, Lahden ammattikorkeakoulu, Lahti.
- Riet, K., Tramper, H. 1991. Basic bioreactor design. Marcel Dekker, New York.

- Rikkinen, J. 2006. Elektro-osmoosin soveltuminen pesuprosessin suotopuristinsakan puhdistamiseen. Insinööriyö, Lahden ammattikorkeakoulu, Lahti.
- Sajamo, J. 1997. Bioreaktori- ja puhdistus selvitys. Insinööriyö, Turun teknillinen ammattikorkeakoulu, Turku.
- SKS Automaatio Oy. 2006. Kaapelitarvikkeet. Esite.
- STREAMS. 2005. Tehokomp. Loppuraportti.
- Vink Finland Oy. 2006. Tuotekuvasto [verkkójulkaisu]. Viitattu 18.1.2007.
<http://www.vink.fi/Default.aspx?ID=17203>
- Williams, J. Keys to bioreactor selections. CEP Magazine (2002), s. 34-41., viitattu 3.1.2007, <http://bio.aiche.org/pdfs/Articles/KEYSTO~1.pdf>.

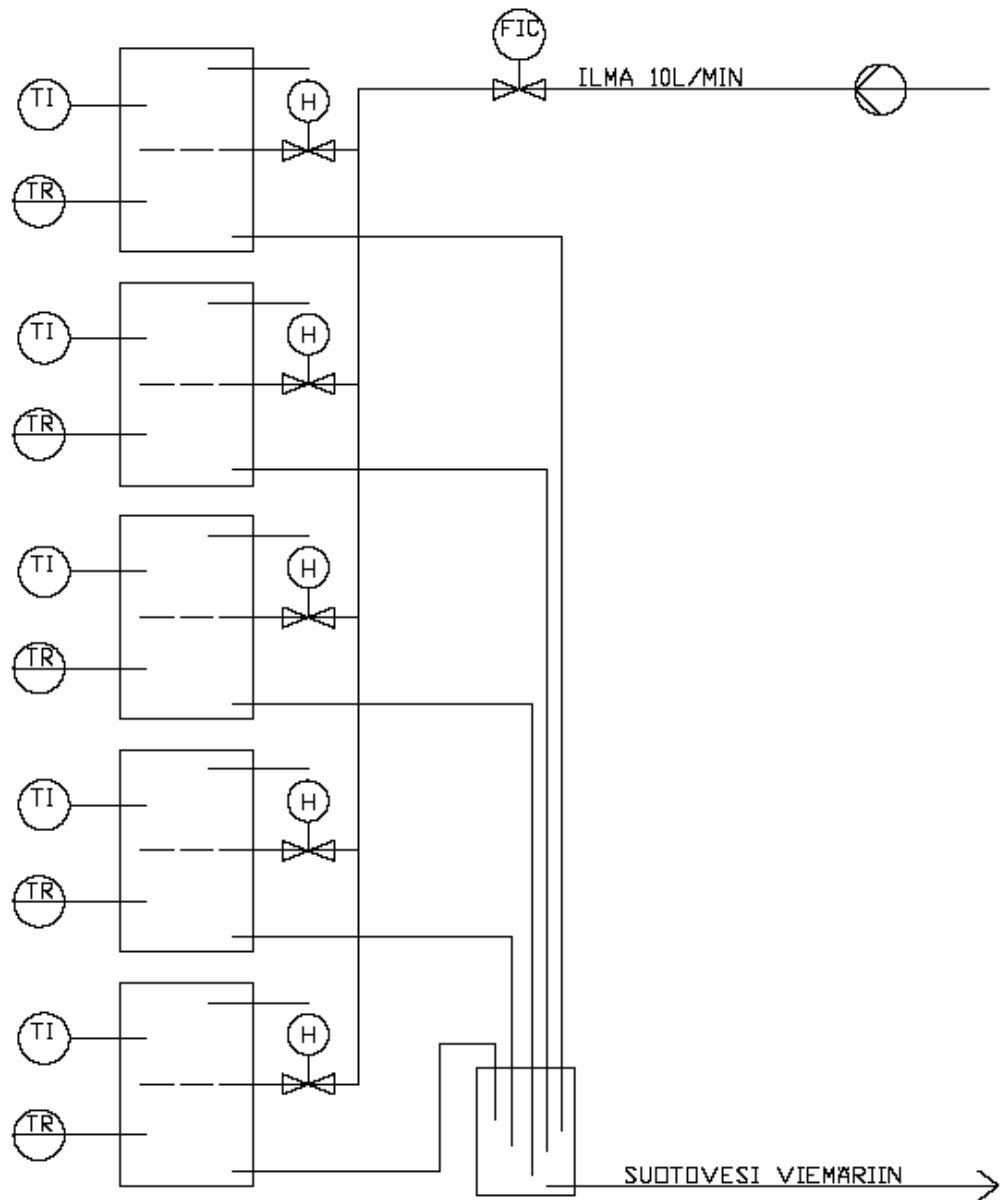
LIITTEET

LIITE 1 Kompostikoejärjestelmä

LIITE 2 Maaperänpuhdistusjärjestelmä

LIITE 3 Palautekyselylomake

LIITE 1



KOEJÄRJESTELY 1						R1	päiväys	nimi	
							piir	8.2	Levan
							tar		
KOMPOSTIKOEREAKTORIT INSTRUMENTOINTI, KAASUN JA NESTEEN KIERTO							LIITE 1		

LIITE 3

Palaute (ryhmäkohtainen)

Kuinka paljon ryhmältänne kului aikaa tehtävien suorittamiseen?

alle 1 tunti

1-2 tuntia

2-3 tuntia

yli 3 tuntia

Mikä seuraavista tehtävistä vei eniten aikaa?

pH:n mittaus

lämpötilojen tarkastus

kaasukromatografi

sekoitus

näytteenotto

Tuntuivatko tulokset ja menetelmät luotettavilta?

Olisitteko valmis suorittamaan tämän kaltaisia harjoitustöitä enemmän eri kurssien osana?

Kyllä

En

Mihin kursseihin (ts. millaisiin sovelluksiin) uskoisitte että reaktoreita voisi käyttää?

Kehitysehdotuksia reaktoreihin

Muu palaute harjoituksesta ja tehtävistä yleisesti
