

Skripsi

**BIOELEKTRISITAS *WHEY* DANGKE MENGGUNAKAN BAKTERI
Lactobacillus plantarum DENGAN SISTEM *MICROBIAL*
FUEL CELLS (MFCs)**

**DIRAYANTI
H311 16 021**



**DEPARTEMEN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2020**

**BIOELEKTRISITAS WHEY DANGKE MENGGUNAKAN BAKTERI
Lactobacillus plantarum DENGAN SISTEM *MICROBIAL*
FUEL CELSS (MFCs)**

*Skripsi ini diajukan sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar sarjana sains*

Oleh:

**DIRAYANTI
H311 16 021**



MAKASSAR

2020

SKRIPSI

**BIOELEKTRISITAS WHEY DANGKE MENGGUNAKAN BAKTERI
Lactobacillus plantarum DENGAN SISTEM MICROBIAL
FUEL CELLS (MFCs)**

Disusun dan diajukan oleh:

**DIRAYANTI
H311 16 021**

Skripsi ini telah diperiksa dan disetujui oleh:

Pembimbing Utama

r. Hannah Natsir, M.Si
IP. 19620320 198711 2 001

Pembimbing Pertama

Abdur Rahman Arif, S.Si, M.Si
NIP. 19861008 201504 1 002

iii



LEMBAR PERSEMBAHAN

“Se'lluka ri ale'ng kabo, upusa nawa-nawa ati mallolonge'ng”

“Ketika kamu berada dalam kabut tebal, dan pikiranmu telah kehabisan akal mencari jalan keluar, maka hatimu akan menemukan jawabannya”

“When you are in a thick mist and your mind already run out of reason to find a way out, your heart will find the answer”

Skripsi ini saya persembahkan untuk kedua orang tua tersayang, keluarga, teman-teman dan orang-orang yang saya cintai



Semoga Damai, Damai, Damai Selalu

PRAKATA

Segala puji dan syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat dan karunia-Nya selama ini hingga penulis dapat menyelesaikan penelitian yang berjudul “**Bioelektrisitas Whey Dangke Menggunakan Bakteri *Lactobacillus plantarum* dengan Sistem *Microbial Fuel Cells* (MFCs)**”. Berbagai kendala dan tantangan yang dialami penulis namun berkat doa dan dukungan dari segala pihak akhirnya skripsi ini dapat diselesaikan.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua terkasih Ayahanda Wero dan Ibunda Diana yang telah mendidik dan membesarkan penulis, memberikan kasih sayang, dan motivasi. Beserta kakak dan paman saya yang telah membantu, mendukung, dan mendampingi penulis.

Penulis juga mengucapkan terima kasih dan penghormatan setinggi-tingginya kepada Ibu Dr. Hasnah Natsir, M.Si dan Bapak Abdurrahman Arif, M.Si selaku pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam membantu penulis menyelesaikan dan menuntaskan skripsi ini dengan baik. Tak lupa pula penulis mengucapkan terima kasih banyaka kepada Bapak Dr. Syarifuddin Liong, M.Si dan Ibu Syadza Firdauziah, M.Sc sebagai tim penguji telah memberikan arahan dan masukan untuk penulis.

Segenap hati tulus dan penuh hormat penulis juga mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dekan FMIPA Unhas, Dr. Eng. Amiruddin, S.Si, M. Si serta seluruh staf FMIPA Unhas,

Bapak Dr. Abd. Karim, M.Si selaku Ketua Departemen Kimia dan Ibu Dr. Fauziah selaku sekretaris Departemen Kimia dan seluruh dosen yang telah membimbing dan membagi ilmunya kepada penulis selama



menempuh pendidikan serta seluruh staf Departemen Kimia atas bantuannya.

3. Ibu Dr. Nursiah La Nafie selaku penasehat akademik penulis yang telah membimbing dan mengarahkan penulis selama menempuh pendidikan.
4. Seluruh analis pada Departemen Kimia FMIPA Unhas, Kak Anti, Kak Fibhy, Ibu Tini, Pak Sugeng, Kak Linda, dan Pak Iqbal yang telah banyak membantu penulis selama melakukan penelitian.
5. Sahabat penulis Grup Ena-Ena Novi, Afdal, Pian, Mike, Rey, Septi, Eka, Mena, Nisa, dan Fajar yang telah berbagi ilmu pengetahuan, suka dan duka bersama penulis.
6. Teman seperjuangan penulis Anak Lab Atas Mega, Wati, Elya, Putri, dan Melsya yang selama ini telah mendukung dan memotivasi serta turut berbagi suka dan duka selama menyelesaikan skripsi.
7. Senior penulis Kak Akbar yang selama ini telah memberikan dukungan, saran, arahan sekaligus bimbingan selama penelitian hingga skripsi ini terselesaikan.
8. Semua pihak yang tidak sempat tertulis namanya yang telah memberikan dukungan maupun bantuan kepada penulis.

Penulis hanyalah manusia biasa yang tidak luput dari kesalahan sehingga penulis menyadari bahwa apa yang penulis sajikan ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu dengan segala kerendahan hati, penulis mengharapkan kritikan dan saran yang membangun dari semua pihak, dan semoga skripsi ini dapat

bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkan

Penulis

2020

vi



Abstrak

Whey dangke merupakan limbah hasil pembuatan keju tradisional khas kabupaten Enrekang. Secara komposisi, *whey* dangke memiliki kandungan nutrisi yang cukup tinggi salah satunya adalah laktosa. Kandungan laktosa dalam *whey* dangke memiliki potensi sebagai bahan baku utama dalam sistem MFCs untuk menghasilkan beda potensial, sehingga pada penelitian ini digunakan *whey* dangke sebagai substrat untuk bakteri *Lactobacillus plantarum* dalam sistem MFCs. Tahapan metode diawali dengan mengoptimasi beda potensial sistem MFCs pada variasi konsentrasi *whey* dangke (20%; 80%; 100%) dan kecepatan agitasi (150; 120; 90 rpm). Kemudian untuk tahap akhir dilakukan rangkaian 4 seri yang dihubungkan dengan lampu LED 1,8 V. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi *whey* dangke optimum pada konsentrasi *whey* 80% dengan beda potensial 600 mV dan kecepatan agitasi optimum pada kecepatan 150 rpm dengan beda potensial 650 mV. Sedangkan rangkaian seri 4 menghasilkan beda potensial sebesar 990 mV, kuat arus listrik 0,09 mA, dan energi sistem optimum 20,2 kJ. Penelitian ini membuktikan bahwa *whey* dangke memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai sumber bioenergi alternatif dengan metode MFCs.

Kata kunci: Beda Potensial, *L. plantarum*, MFCs, *Whey* dangke



Abstract

Whey dangke is a liquid waste of traditional cheese production in Enrekang. In composition, it is contained high nutrition which one is lactose. Lactose in *whey* dangke has a potential as raw material in MFCs system to produce voltage. Then, this research is carried out about MFCs using whey dangke as substrate of *Lactobacillus plantarum*. The stages of this methode was started to optimize the volgte of MFCs on variation of whey dangke concentration (20%; 80%; 100%) and agitation (150; 120; 90 rpm). The final stages, it was assembled into series 4 to connect with 1,8 V LED lamp. The result of this study showed that optimum concentration of *whey* dangke at concentration *whey* 80% with voltage 600 mV and optimum agitation speed at 150 rpm with voltage 650 mV. Whereas, series 4 produced 990 mV voltage, 0,09 mA current, and 20,2 kJ optimal energy system. This research proved that *whey* dangke has potential to be developed as an alternative bioenergy source with MFCs methode.

Keyword: Voltage, *L. plantarum*, MFCs, *Whey* dangke



DAFTAR ISI

	Halaman
PRAKATA.....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
DAFTAR SINGKATAN.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Bioelektrisitas.....	5
2.2 <i>Whey</i> Dangke.....	6
2.3 <i>Microbial Fuel Cell</i>	8
2.4 Metabolisme Laktosa.....	10
2.5 Metabolisme Glukosa.....	12
2.6 Potensi Energi Listrik Substrat Laktosa dalam MFC.....	14
2.7 Peranan Bakteri Asam Laktat.....	16
METODE PENELITIAN.....	20
1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	20



3.2 Bahan Penelitian	20
3.3 Alat Penelitian.....	20
3.4 Prosedur Penelitian.....	20
3.4.1 Pembuatan Reagen Fehling	20
3.4.2 Reagen Benedict	21
3.4.3 Pembuatan Reagen Teles.....	21
3.4.4 Pembuatan 1 L Larutan KMnO_4 0,1 M	21
3.4.5 Pembuatan 500 mL Larutan NaOH 0,1 M.....	21
3.4.6 Pembuatan 1 L KCl 1 M.....	21
3.4.7 Pembuatan 500 mL Larutan Buffer Fosfat 0,2 M pH 7.....	21
3.4.8 Preparasi Komponen MFCs.....	22
3.4.8.1 Pembuatan Jembatan Garam	22
3.4.8.2 Preparasi Larutan Elektrolit.....	22
3.4.8.3 Preparasi Elektroda.....	22
3.4.9 Preparasi Substrat	22
3.4.9.1 Uji Kualitatif Laktosa Menggunakan Uji Fehling.....	22
3.4.9.2 Uji Kualitatif Laktosa Menggunakan Uji Benedict.....	22
3.4.9.3 Uji Kuantitatif Laktosa Menggunakan Uji Teles	23
3.4.10 Preparasi Mikroorganisme <i>Lactobacillus plantarum</i>	23
3.4.10.1 Pembuatan Medium Padat Tumbuh Bakteri	23
3.4.10.2 Peremajaan Bakteri pada Media Padat Tumbuh Bakteri	24
3.4.10.3 Pembuatan <i>Starter</i> untuk Media Produksi	24
3.4.10.4 Pembuatan Kurva Pertumbuhan.....	24
3.4.10.5 Pengukuran Kadar Asam Laktat	24
4.11 Persiapan Reaktor MFCs.....	25
	x



3.4.12 Eksprimen MFCs	25
3.4.12.1 Pengukuran Beda Potensial Standar MFCs.....	25
3.4.12.2 Pengukuran Beda Potensial terhadap Variasi Konsentrasi Substrat <i>Whey</i> Dangke	26
3.4.12.3 Pengukuran Beda Potensial terhadap Variasi Kecepatan Agitasi	26
3.4.12.4 Pengukuran Beda Potensial, Arus Listrik dan Energi Optimum pada Rangkaian Seri 4.....	27

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengambilan dan Pengujian Sampel <i>Whey</i> Dangke.....	28
4.2 Uji Kualitatif Laktosa Menggunakan Uji Fehling dan Benedict	28
4.3 Uji Kuantitatif Laktosa Menggunakan Uji Teles	30
4.4 Penentuan Kadar Asam Laktat.....	31
4.5 Desain <i>Microbial Fuel Cells</i> (MFCs)	32
4.6 Mekanisme Reaksi yang Terjadi di Katoda dan Anoda.....	34
4.7 Peremajaan Isolat Bakteri <i>L. plantarum</i> pada Berbagai Media Tumbuh	36
4.7.1 Media MRSA	37
4.7.2 Media <i>Whey</i> 20%	37
4.7.3 Media <i>Whey</i> 80%	38
4.7.4 <i>Whey</i> 100%.....	38
4.8 Pengukuran Beda Potensial.....	38
4.8.1 Pengukuran Beda Potensial Standar.....	38
8.2 Pengukuran Beda Potensial terhadap Variasi Konsentrasi <i>Whey</i> Dangke	39
8.3 Pengukuran Beda Potensial terhadap Variasi Kecepatan Agitasi	43



4.9 Pengukuran Beda Potensial, Kuat Arus dan Energi pada Rangkaian Seri 4.....	47
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	49
5.2 Saran.....	49
DAFTAR PUSTAKA	50
LAMPIRAN.....	56



DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Beberapa Potensi Aplikasi Bioelektrositas	5
Komposisi <i>Whey</i> Dangke	7
Komposisi Media MRS.....	8
Beberapa Penelitian Terkait <i>Microbial Fuel Cells</i> (MFCs).....	15
Genus <i>Lactobacillus</i> sp	19
Jenis-jenis Media Tumbuh Tumbuh Bakteri.....	23
Hasil Uji Kualitatif Laktosa dalam <i>Whey</i> Dangke	28
Nilai Elektrisitas MFCs <i>Whey</i> Dangke pada Rangkaian Seri 4	47
PenelitianTerkait Rangkaian Seri MFCs.....	48



DAFTAR GAMBAR

Gambar

Halaman

<i>Whey</i> Dangke dan Dangke yang Belum Dipisahkan	6
Diagram MFCs.....	9
Reaksi Redoks pada Sistem <i>Microbial Fuel Cell</i> dengan Substrat Laktosa	10
Reaksi Pemecahan Molekul <i>O-β-D-Galactopyranosyl-(1→4)-α-D Glucopyranose</i> menjadi <i>β-D-Galactose</i> dan <i>α-D-Glucose</i>	11
Metabolisme Galaktosa melalui <i>Leloir Pathway</i>	12
Jalur Glikolisis	13
Diagram Homofermentatif.....	17
Diagram Heterofermentatif.....	18
Hasil Uji Kualitatif Sampel <i>Whey</i> Dangke Menggunakan Metode Fehling dan Benedict.....	29
Reaksi Fehling pada Laktosa	29
Reaksi Benedict pada Laktosa	30
Reaksi Teles pada Laktosa.....	30
Reaksi Fermentasi Laktosa Menjadi Asam Laktat	31
Desain MFCs	32
Digital Multimeter Pengukur Tegangan dan Kuat Arus	33
Sistematika Prinsip Kerja MFCs.....	35
Pertumbuhan <i>L. plantarum</i> pada Media MRSA, Media <i>Whey</i> 20%, Media <i>Whey</i> 80% dan Media <i>Whey</i> 100%	36
Pengukuran Beda Potensial terhadap Variasi Konsentrasi Substrat Dangke 20%; 80%; dan <i>Whey</i> 100%	40
Pengaruh Konsentrasi Substrat Laktosa dan Asam Laktat Substrat <i>Whey</i> 80%	42
Optimization Software: www.balesio.com	xiv



Grafik Pengukuran Beda Potensial terhadap Variasi Kecepatan Agitasi 90 rpm; 120 rpm; dan 150 rpm	44
Grafik Kurva Pertumbuhan Bakteri <i>L. plantarum</i> Substrat Whey 80%	45
Grafik Kadar Laktosa dan Asam Laktat paada Kecepatan Agitasi 150 rpm ...	46



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
Diagram Alir Penelitian	56
Pembuatan Reagen.....	57
Pembuatan dan Preparasi Rangkaian MFCs	60
Uji Kualitatif Laktosa dalam <i>Whey</i> Dangke	61
Uji Kuantitatif Laktosa dalam <i>Whey</i> Dangke Menggunakan Uji Teles.....	62
Pembuatan Media Tumbuh Bakteri	63
Pengukuran Kadar Asam Laktat	65
Pengukuran Beda Potensial Standar MFCs	66
Pengukuran Beda Potensial terhadap Variasi Konsentrasi Substrat <i>Whey</i> Dangke	67
Pengukuran Beda Potensial terhadap Variasi Kecepatan Agitasi.....	68
Pengukuran Beda Potensial, Kuat Arus, dan Jumlah Energi pada Rangkaian Seri 4	69
Beberapa Penelitian Terkait MFCs	70
Tabel Data Kurva Pertumbuhan Bakteri <i>L. plantarum</i> pada Media <i>Whey</i> 80%, 37 °C, 130 rpm.....	74
Tabel Data Beda Potensial Variasi Konsentrasi Substrat <i>Whey</i> 100%, <i>Whey</i> 80%, dan <i>Whey</i> 20%	75
Tabel Data Kadar Laktosa Variasi Konsentrasi Substrat <i>Whey</i> 100%, <i>Whey</i> 80%, dan <i>Whey</i> 20%	76
Tabel Data Produksi Asam Laktat Variasi Konsentrasi Substrat <i>Whey</i> 100%, <i>Whey</i> 80%, dan <i>Whey</i> 20%	77
Tabel Data Beda Potensial Variasi Agitasi 150 rpm, 120 rpm, dan 90 rpm....	78
Tabel Data Kadar Laktosa Variasi Agitasi	79
Tabel Data Produksi Asam Laktat Variasi Agitasi 150 rpm, 120 rpm,	79
	xvi



dan 90 rpm	80
Kurva Panjang Gelombang Maksimum.....	81
Kurva Standar Laktosa untuk Pengukuran Kadar Laktosa dengan Metode Teles.....	82
Perhitungan Energi MFC <i>Whey</i> Dangke Seri 4	83
Dokumentasi Penelitian	85



DAFTAR SINGKATAN

ATP	= Adenosin trifosfat
BAL	= Bakteri Asam Laktat
FAD ⁺	= Flavin Adenin Dinukleotida
FADH ₂	= Flavin Adenin Dinukleotida Dihidrogen
GALM	= <i>Galactose Mutarotase</i>
GALT	= <i>Galactose-1-Phosphate Uridyltransferase</i>
MFCs	= <i>Microbial Fuel Cells</i>
MRS	= <i>Man, Rogosa, Sharpe</i>
NAD ⁺	= Nikotinamida Adenin Dinukleotida
NADH ₂	= Nikotinamida Adenin Dinukleotida Dihidrogen
TEA	= <i>Terminal Electron Acceptor</i>
UDP	= Uridin 5'-Difosfo
Rangkaian Seri 4	= Rangkaian listrik yang terdiri atas 4 sistem/komponen MFCs yang saling terhubung antar elektrodanya
OCV	= <i>Open Circuit Voltage</i> merupakan tegangan sirkuit luar yang terukur tanpa adanya arus listrik yang mengalir dalam suatu sistem



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kabupaten Enrekang merupakan daerah yang telah menjadi prioritas pengembangan peternakan sapi perah di Provinsi Sulawesi Selatan. Menurut Nurhaedah dkk. (2019), populasi sapi perah di Kabupaten Enrekang mencapai 6.908 ekor. Total populasi tersebut mampu menghasilkan susu sapi murni hingga 5.014 L setiap harinya yang digunakan sebagai bahan baku pembuatan makanan keju lunak khas Kabupaten Enrekang yaitu dangke (Pulungan dkk., 2020).

Dangke dikenal sebagai makanan tradisional atau *indigenous product* bagi masyarakat Kabupaten Enrekang. Dangke diproduksi dari susu sapi melalui proses penggumpalan menggunakan getah pepaya (Rahman, 2014), di mana untuk satu biji dangke yang beratnya 330 – 350 gram diperlukan 1,5 liter susu sapi (Baba, 2012). Pada tahap pengolahan dangke dilakukan proses pemisahan antara gumpalan (*curd*) dan cairan (*whey*) (Zulfikar, 2018). *Whey* ini dihasilkan sekitar 3.600 liter per hari dan umumnya dibuang begitu saja. Hal ini dapat menimbulkan pencemaran bagi lingkungan sekitar akibat proses pembusukan oleh mikroorganisme (Suhendro, 2017; Fatma dkk., 2012). Dalam penelitian Sulmiyati dan Malaka (2017), sisa hasil pengolahan dangke berupa limbah cair dangke (*whey*) mengandung sedikitnya 2% (v/v) laktosa.

Suhendro (2017) telah mencoba untuk memanfaatkan nutrisi *whey* dangke

pengolahannya menjadi minuman fermentasi. Kandungan laktosa yang tinggi memberikan nutrisi bagi konsumen. Hal ini juga bertujuan untuk mengurangi pembuangan *whey* dangke. Pada tahun 2018, Maruddin meneliti fungsi



lain dari *whey* dangke dengan memanfaatkannya sebagai pembuatan *edible film* yang dikombinasikan dengan karagenan untuk menghasilkan plastik *biodegradable*. Kandungan nutrisi *whey* dangke seperti laktosa tergolong tinggi sebagai hasil dari sisa pengolahan keju dangke. Disisi lain, pemanfaatan laktosa untuk berbagai penelitian sudah lebih maju. Salah satunya adalah pemanfaatan laktosa dalam limbah keju sebagai substrat pertumbuhan bakteri asam laktat untuk menghasilkan energi menggunakan *Microbial Fuel Cells* (MFCs) (Chirag dan Yagnik, 2013; Fetlawi dan Hadi, 2018).

Metode MFCs adalah suatu metode bioelektrokimia yang memanfaatkan bakteri dalam mendegradasi limbah organik menghasilkan ion elektron dan proton. Ion-ion inilah yang menyebabkan terjadinya beda potensial dan menghasilkan energi listrik (Cao dkk., 2019). Metode ini secara langsung mengubah energi kimia menjadi energi listrik melalui reaksi bioelektrokimia menggunakan mikroorganisme atau katalis enzim (Das, 2018). Alat MFCs dibentuk dari rangkaian *chamber* anoda anaerob dan *chamber* katoda aerob yang secara fisik disambungkan oleh membran penukar anion. Mikroorganisme digunakan untuk mengoksidasi susbtrat di anoda, kemudian proton yang dihasilkan ditransfer menuju katoda melalui membran penukar anion. Sedangkan elektron mengalir menuju elektroda berbahan konduktif yang memiliki resistensi (Logan, 2008).

Penelitian terkait MFCs telah memanfaatkan bakteri asam laktat untuk menghasilkan energi dengan cara mendegradasi karbohidrat menjadi asam laktat.

Vega dan Fernandez (1987) melakukan penelitian tentang glukosa sebagai substrat

han bakteri *Lactobacillus plantarum*, *Streptococcus lactis* dan *Erwinia* s untuk memperoleh daya maksimum. Penelitian terkait juga dilakukan awati dkk. (2015) menggunakan variasi substrat *whey* tahu, glukosa dan



laktosa dengan jenis bakteri *Lactobacillus plantarum* untuk memperoleh beda potensial maksimum. Pada tahun 2018 Ainun dan Suyati memanfaatkan bakteri *Lactobacillus plantarum* untuk mendegradasi substrat laktosa. Selain itu, Kusuma dkk. (2018) juga memanfaatkan laktosa sebagai sumber nutrisi pada pertumbuhan bakteri *Lactobacillus bulgaricus* untuk menghasilkan energi.

Berdasarkan uraian pada latar belakang ini, maka pemanfaatan laktosa dalam whey dangeke dapat dikembangkan melalui penggunaan MFCs. Whey dangeke yang mengandung laktosa dapat menjadi substrat bagi bakteri asam laktat seperti *Lactobacillus plantarum* untuk menghasilkan energi. Oleh karena itu, dilakukan penelitian untuk mengetahui bioelektrisitas bakteri *Lactobacillus plantarum* yang mendegradasi laktosa dalam whey dangeke menggunakan sistem MFCs. Penelitian ini dapat menjadi langkah alternatif dalam memanfaatkan limbah hasil pengolahan makanan tradisional dangeke.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian adalah:

1. berapa beda potensial optimum yang dihasilkan pada variasi konsentrasi substrat whey dangeke?
2. berapa beda potensial optimum yang dihasilkan pada variasi agitasi?
3. berapa beda potensial dan kuat arus optimum yang dihasilkan pada rangkaian seri 4 ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian adalah:

menentukan beda potensial optimum yang dihasilkan pada variasi konsentrasi substrat whey dangeke,



2. menentukan beda potensial optimum yang dihasilkan pada variasi agitasi, dan
3. menentukan beda potensial dan kuat arus optimum yang dihasilkan pada rangkaian seri 4.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah menghasilkan bioenergi dari *whey* dangke, dan menambah pengetahuan mengenai sumber-sumber baru aktivitas degradasi bakteri terhadap laktosa.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

1.1 Bioelektrisitas

Bioelektrisitas (*Bioelectricity*) terdiri atas kata *bio* (biologi) yang berarti makhluk hidup dan *elektrisitas* yaitu besaran listrik yang berubah dalam waktu tertentu. Bioelektrisitas merupakan fenomena kelistrikan dalam unit dasar kehidupan. Fenomena ini terjadi pada sel yang terpolarasi oleh suatu proses biokimia menggunakan energi (Jeong, 2014; Grimnes, 2008). Perkembangan bioelektrisitas mengacu pada regulasi sel, jaringan dan pola perilaku tingkat organ yang dimediasi secara elektrik. Pembawa muatan dalam bioelektrisitas berupa ion (atom bermuatan) beserta arus listrik (Grimnes, 2015).

Tabel 1. Beberapa Potensi Aplikasi Bioelektrisitas (Nealson, 2017)

Kategori	Input
Produksi Energi menggunakan MFCs	Limbah biologis
	Pertanian
	Industri
	Limbah makanan
Baterai Sedimen	Senyawa organik dalam sedimen
Remediasi Logam	Sedimen yang terkontaminasi logam
Elektrosintesis	DC via Katoda
Akademik dan Pendidikan	Berbagai jenis input anoda dan katoda yang digunakan saat ini

Perkembangan bioelektrisitas mikroba berawal dari pemanfaatan dan produksi bakteri dan ragi pada tahun 1911 oleh Potter. Penelitian ini terus berkembang hingga memasuki pertengahan abad ke-20, namun pada awal percobaan

akan potensial yang sangat rendah. Hingga pada tahun 1988, kondisi mulai saat terbit dua tulisan yang memuat simulasi pertumbuhan dua jenis bakteri *Shewanella* dan *Geobacter* pada logam oksida sebagai akseptor elektron.



Selama hampir 30 tahun, kedua bakteri ini digunakan sebagai bahan penelitian untuk proses transpor elektron ekstraseluler. Adapun aplikasi bioelektrisitas dapat dilihat pada Tabel 1 (Nealson, 2017).

2.2 Whey Dangke

Dangke dihasilkan melalui pemanasan susu segar yang ditambahkan larutan getah pepaya sehingga susu membentuk gumpalan (*curd*) dan cairan (*whey*) seperti pada gambar 1. Jumlah susu yang diolah menjadi dangke di Kabupaten Enrekang sekitar 6.000 liter per hari. Penanganan *whey* sangat diperlukan untuk pencegahan pencemaran lingkungan, karena pada umumnya limbah *whey* dangke dibuang begitu saja (Fatma dkk., 2012). Pemanfaatan *whey* dangke selama ini hanya dalam bentuk pemberian pada ternak dan sebagai minuman. Jika *whey* yang tidak termanfaatkan dibuang ke tanah atau sungai dapat menimbulkan masalah polusi bagi lingkungan (Suhendro, 2017).



Gambar 1. *Whey* Dangke dan Dangke yang Belum Dipisahkan



Whey dangke merupakan limbah dangke, yang belum banyak dimanfaatkan. merupakan produk sejenis keju tanpa fermentasi yang dipisahkan dari *curd* dengan menambahkan getah buah pepaya sebagai sumber enzim. *Whey* dangke memiliki

kandungan laktosa dan komponen nutrisi lainnya yang dibutuhkan untuk pertumbuhan mikroorganisme. *Whey* memiliki sisa hasil pengolahan dangke yang jumlahnya sekitar 3.600 liter per hari dan umumnya dibuang begitu saja. Penanganan *whey* dangke sangat diperlukan untuk pencegahan pencemaran lingkungan. *Whey* dangke mengandung 6,5% padatan yang terdiri atas 4,8% laktosa; 0,6% protein; 0,6% mineral; 0,15% asam laktat; 0,25% nitrogen non protein, dan 0,1% lemak (Fatma dkk., 2012). Komponen *whey* dangke juga telah diteliti oleh Faridah (2019). Komposisinya dapat dilihat pada tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Komposisi *Whey* Dangke

No	Komponen	Komposisi (%)
1	Padatan	7,55
2	Lemak	0,83
3	Laktosa	5,49
4	Protein	0,36

Whey mengandung sekitar 55% total nutrisi dari susu seperti laktosa, protein terlarut, lemak, vitamin yang larut dalam air, dan garam mineral. *Whey* susu sapi memiliki kandungan laktosa kisaran nilai 4,39% - 4,59% (Fatma dkk., 2012). Ketersediaan laktosa dan adanya nutrisi penting lain yang dapat digunakan sebagai pertumbuhan mikroorganisme membuat *whey* menjadi salah satu substrat potensial untuk produk bioteknologi. Bakteri *Lactobacillus plantarum* dan *Lactobacillus bulgaricus* merupakan bakteri yang memanfaatkan laktosa sebagai substrat pada sistem *Microbial Fuel Cells* (Putra dkk., 2014). Kedua spesies bakteri asam laktat ini tumbuh baik pada media spesifiknya yaitu MRS karena mengandung nutrisi

seperti pada tabel 3 (Safitri dkk., 2016). Berdasarkan nutrisi tersebut, *whey* dangke juga mengandung beberapa komposisi yang sama, sehingga *whey* dangke dapat berpotensi sebagai media tumbuh bakteri asam laktat.



Tabel 3. Komposisi Media MRS

No	Komponen	Komposisi (g/L)
1	Dekstrosa	20
2	Pepton	10
3	Ekstrak daging	8
4	Sodium asetat	5
5	Ekstrak yeast	4
6	Dipotassium pospat	2
7	Ammonium sitrat	2
8	Tween 80	1
9	Magnesium sulfat	0,2
10	Mangan sulfat	0,05

2.3 Microbial Fuel Cell

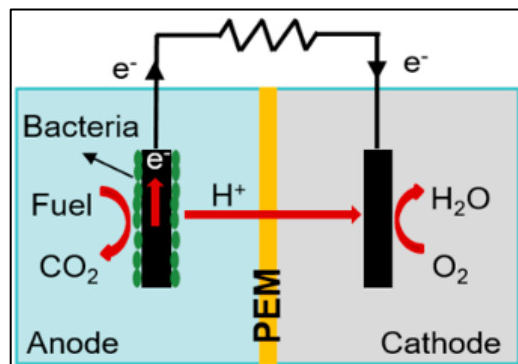
Microbial Fuel Cells (MFCs) adalah bioreaktor yang mengubah bioenergi dari biomassa menjadi energi listrik dengan memanfaatkan bakteri eksoelektrogen sebagai elektrokatalis (Ibrahim dkk., 2019). Salah satu energi alternatif yang dikembangkan hingga saat ini adalah MFCs yang memanfaatkan mikroorganisme untuk menghasilkan energi listrik (Logan dkk., 2006). Adanya aktifitas katalitik mikroorganisme dalam mengoksidasi senyawa organik pada keadaan anaerobik mampu mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Kondisi ini dimanfaatkan oleh alat MFCs sebagai bioreaktor (Du dkk., 2007). Analisis populasi bakteri dari mikroorganisme pada MFCs telah diteliti dengan jenis bakteri yang bervariasi. Fernandez dan Vega telah menggunakan *Lactobacillus plantarum*, *Sterptococcus lactis* dan *Erwinia dissolvens* dalam sistem MFCs menggunakan substrat glukosa (Vega dkk., 1987). Sedangkan pada penelitian Ainun dan Suyati (2018) menggunakan bakteri jenis *Lactobacillus plantarum* dengan substrat laktosa

umber nutrien.

anisme kerja MFCs pada umumnya sama seperti *fuel cell* biasa yaitu atas suatu katoda, anoda dan larutan elektrolit seperti pada gambar 2.



Perbedaannya terletak pada kompartemen anoda alat MFCs memanfaatkan kultur mikroba (Reyes, dkk., 2018). Metabolisme mikroba dalam keadaan anaerob dapat memecah glukosa menjadi proton, elektron, dan karbon dioksida (CO_2). Selanjutnya elektron mengalir menuju anoda melalui sirkuit luar, sedangkan proton berdifusi melalui jembatan garam menuju katoda (Muralidharan dkk., 2011; Chirag dan Yagnik, 2013).



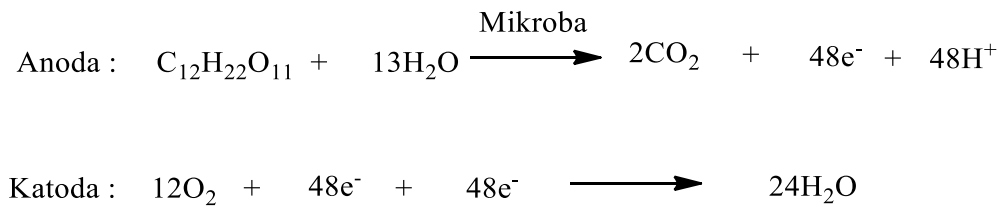
Gambar 2. Diagram MFCs (Reyes dkk., 2018)

Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kerja alat MFCs, yaitu jenis substrat, jenis larutan elektrolit, jenis elektroda, dan rangkain listrik. Substrat merupakan faktor yang sangat berperan dalam besar kecilnya produksi listrik pada alat MFCs, karena substrat menjadi sumber nutrisi bagi mikroba untuk melakukan metabolisme (Inayati dkk., 2015; Ainun dkk., 2018). Dalam penelitian Ainun dan Suyati (2018) memanfaatkan bakteri *Lactobacillus plantarum* dan laktosa sebagai substrat yang ditempatkan pada kompartemen anoda. Sedangkan kompartemen katoda berisi larutan elektrolit KMnO_4 . Masing-masing kompartemen dikondisikan pada pH 7 dan mampu menghasilkan energi listrik sebesar 290,51 mW.



urut Ibrahim dkk., 2017, senyawa organik (dalam hal ini glukosa ataupun) akan terdegradasi oleh bakteri menghasilkan elektron yang dapat dengan TEA (*Terminal Electron Acceptor*) misal oksigen, nitrat, nitrit,

sulfat dan sebagainya yang berdifusi melalui sel. Kemudian elektron tersebut akan ditangkap oleh anoda, sedangkan proton akan ditangkap oleh katoda. Hal ini menyebabkan timbulnya biolistrik. Adapun reaksi yang mungkin terjadi dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Reaksi Reduksi Oksidasi pada Sistem *Microbial Fuel Cell* dengan Substrat Laktosa (Kalia dan Kumar, 2017)

Penggunaan susbtrat dalam alat MFCs mengarah pada pemanfaatan produk samping dari limbah *cheese whey*, limbah cair industri tapioka, *paneer whey* dan limbah cair industri bir. Salah satu substrat yang dapat dikembangkan adalah *whey* dangke (Inayati dkk., 2015).

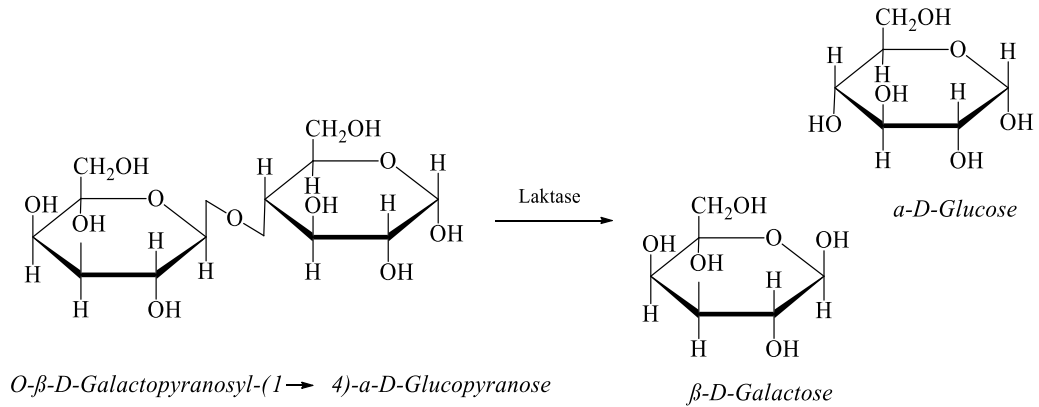
2.4 Metabolisme Laktosa

Laktosa merupakan golongan karbohidrat disakarida yang apabila dihidrolisis akan menghasilkan glukosa dan galaktosa dengan bantuan enzim laktase, seperti yang terlihat pada gambar 4 dan glukosa yang dihasilkan digunakan langsung untuk proses glikolisis. Berbeda dengan galaktosa, yang harus melalui beberapa tahap (Coelho dkk, 2015). Galaktosa akan diubah menjadi glukosa dengan bantuan enzim menuju ke reaksi glikolitik (Murray, 2003).

Kipin glukosa dan galaktosa memiliki rumus molekul yang sama yaitu $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ namun perbedaan struktur pada konfigurasi C ke 4 menyebabkan enzim yang berperan dalam tahap glikolisis tidak mampu mengenali



galaktosa. Untuk masuk ke dalam tahap glikolisis, galaktosa harus diubah menjadi glukosa-6-fosfat melalui reaksi berdasarkan gambar 5 (Putra dkk, 2014).



Gambar 4. Reaksi Pemecahan Molekul *O-β-D-Galactopyranosyl-(1→4)-α-D-Glucopyranose* (Laktosa) menjadi *β-D-Galactose* dan *α-D-Glucose* (Shendurse dkk., 2016; Murray dkk., 2003)

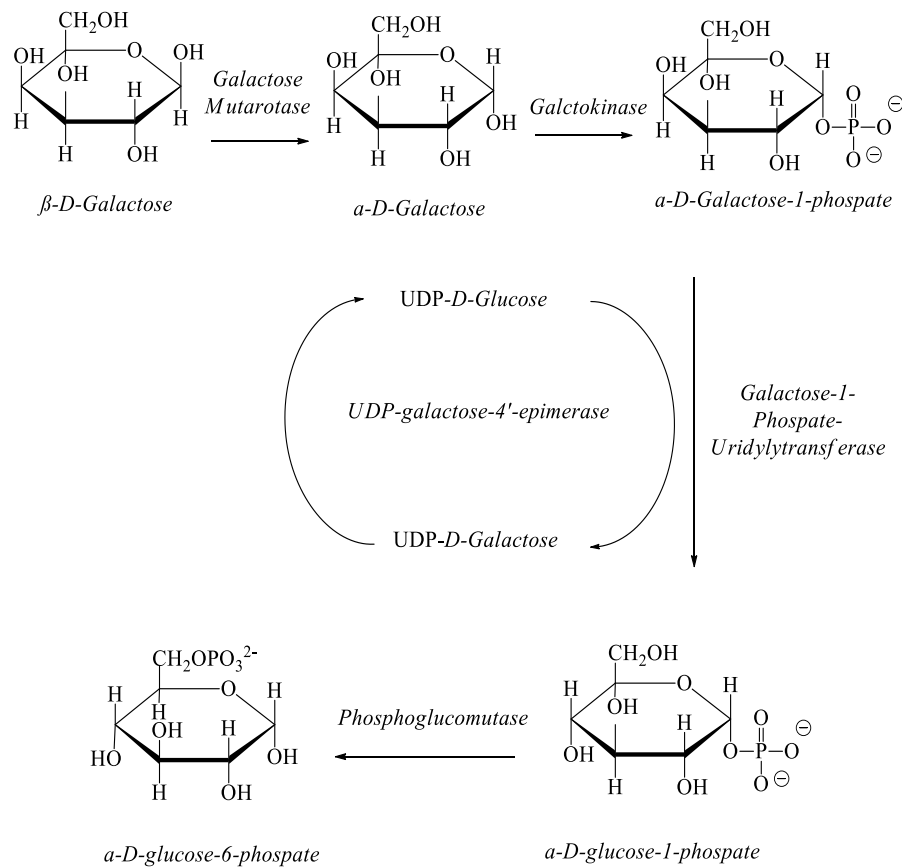
Metabolisme laktosa diubah lebih lanjut menjadi glukosa-6-fosfat oleh enzim dari *Leloir Pathway*. Jalur glikolitik tidak mampu mengkatalisis metabolisme laktosa, maka terlebih dahulu melalui jalur *Leloir Pathway*. Pada kebanyakan organisme, terdapat 5 enzim yang terlibat dalam proses konversi galaktosa menjadi glukosa (gambar 5), diantaranya enzim *galactose mutarotase*, *galactokinase*, *galactose-1-phosphate uridylyltransferase*, *UDP-galactose-4-epimerase*, dan *phosphoglucomutase* (Timson, 2007).

Sebelum masuk ke jalur *Leloir Pathway*, *β-D-galactose* dikonversi menjadi *α-D-galactose* dengan bantuan enzim *galactose mutarotase* (GALM). Kemudian, memasuki *Leloir Pathway*, *α-D-galactose* mengalami fosforilasi membentuk *α-D-galactose-1-phosphate* yang dikatalisis oleh *galactokinase*. Selanjutnya, enzim

Galactose-1-phosphate uridylyltransferase) mentransfer *UDP-α-D-glucose* *galactose-1-phosphate* untuk membentuk *Glucose-1-phosphate* dan *UDP-α-D-glucose*. Selanjutnya, Enzim *GALE* (*UDP-galactose-4'-epimerase*)



mengkatalisis interkonversi UDP- α -D-galactose dan UDP- α -D-glucose. Kedua UDP ini adalah donor gula untuk reaksi glikosilasi (produksi glikokonjugasi). Setelah itu, α -D-Glucose-1-Phosphate akan menghasilkan α -D-glucose-6-phosphate dengan bantuan enzim *Phosphoglucomutase* yang lebih lanjut akan menghasilkan glukosa (Coelho dkk., 2015; Timson, 2007).

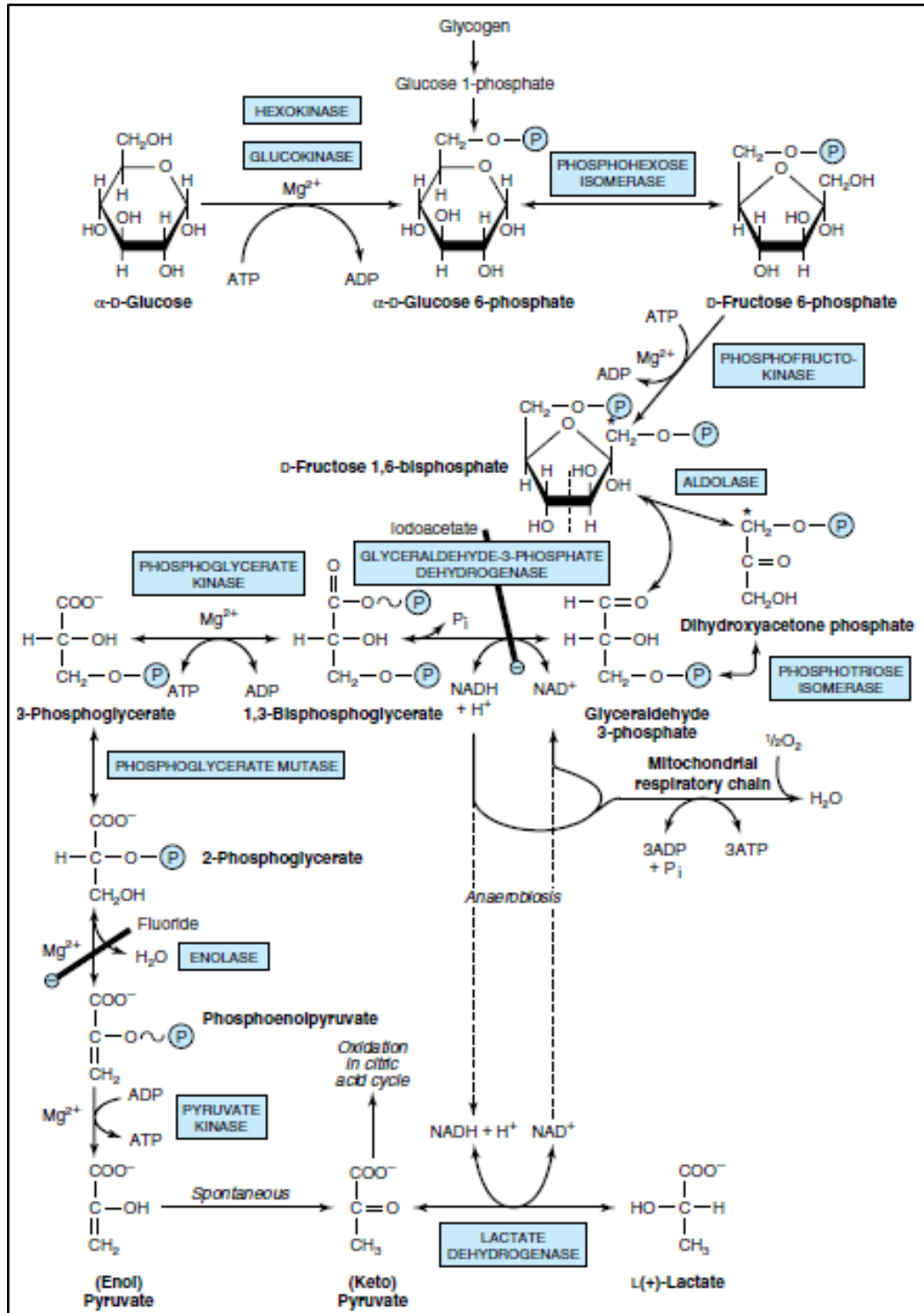


Gambar 5 Metabolisme Galaktosa Jalur *Leloir Pathway* (Coelho dkk., 2015; Timson, 2007; Murray dkk., 2003)

2.5 Metabolisme Glukosa

Reaksi glikolisis glukosa akan dipecah menjadi asam piruvat (seperti pada ...), kemudian masuk ke dalam siklus Krebs. Selanjutnya akan diteruskan ke ...antai transfer elektron dan fosforilasi oksidatif sehingga menghasilkan ... dan proton. (Murray dkk., 2003, Ainun dan Suyati, 2018).





Gambar 6. Jalur Glikolisis (Murray, 2003)



dari proses glikolisis akan dilanjutkan menuju ke tahapan siklus krebs di mitokondria. Pada siklus ini dihasilkan senyawa ATP, NADH₂ dan FADH₂. Selanjutnya adalah rantai transfer elektron di mana NADH₂ dan FADH₂ yang

dihasilkan dari proses glikolisis maupun siklus krebs akan dioksidasi menjadi NAD^+ dan FAD^+ dengan melepaskan elektron dan proton. Tahap akhir proses ini adalah kondisi anaerob, di mana elektron yang dihasilkan dari serangkaian proses di atas akan ditangkap oleh elektroda sebagai akseptor elektron. Elektron tersebut ditransfer melalui sitokrom menuju elektroda di kompartemen anoda lalu dialirkan melalui sirkuit eksternal menuju katoda dan menghasilkan energi listrik. Kondisi inilah yang dimanfaatkan oleh MFCs. Sedangkan proton berdifusi melalui jembatan garam menuju kompartemen katoda (Putra dkk, 2014).

2.6 Potensi Listrik Substrat Laktosa dalam MFCs

Laktosa merupakan salah satu substrat yang berpotensi dalam *Microbial Fuel Cells*. Hal ini sesuai penelitian Ainun dan Suyati (2018) yang membandingkan tiga substrat yaitu laktosa, fruktosa, dan amilum dengan mikroba jenis *Lactobacillus plantarum*. Hasil yang diperoleh menyatakan bahwa laktosa menghasilkan daya sebesar hingga 290,51 mW lebih tinggi dibandingkan dengan fruktosa dan amilum berturut-turut adalah 10,26 mW dan 10,47 mW. Penelitian terkait MFCs dapat dilihat pada tabel 4 berikut.

Selain itu penelitian yang sama juga dilakukan oleh Inayati dkk. (2015) menggunakan tiga substrat yaitu laktosa, *whey* tahu dan glukosa dengan spesies bakteri *Lactobacillus bulgaricus*. Hasilnya juga menunjukkan bahwa laktosa memberikan angka beda potensial lebih besar dibandingkan substrat lainnya yaitu 27,7 mV. Kemudian hasil penelitian Kusuma dkk. (2018) menggunakan substrat

an bakteri *L. plantarum* menunjukkan beda potensial sebesar 710 mV dan penelitian Putra dkk. (2014) juga memberikan beda potensial sebesar 46,6 mV rangkaian MFCs substrat laktosa dan bakteri *Lactobacillus plantarum*.



Tabel 4. Beberapa Penelitian Terkait *Microbial Fuel Cells* (MFCs)

No	Jenis Bakteri	Substrat	Rangkaian	Potensi Listrik	Referensi
1	<i>L. plantarum</i>	Fruktosa	Tunggal	10,26 mW	Ainun dan Suyati (2018)
		Laktosa		63 mW	
		Amilum		27,47 mW	
		Laktosa		63 mW	
		Laktosa	Seri 2	164,74 mW	
			Seri 3	290,51 mW	
2	<i>L. plantarum</i>	Whey tahu	Tunggal	33,3 mV	Ismawati dkk., (2015)
		Glukosa	Tunggal	32,4 mV	
		Laktosa		33,2 mV	
		Whey tahu		63,1 mV	
		Whey tahu		62,7 mV	
				40,8 mV	
3	<i>L. bulgaricus</i>	Whey tahu	Tunggal	42,2 mV	Sari dkk., (2016)
4	Inokulum limbah	Limbah tahu	Seri	80 mV	Putra dkk., (2012)
		Cucian Beras		234 mV	
5		Lumpur	Tunggal	170 mV	Li (2013)
		Tanah		99 mV	
		Rawa		134 mV	
		Lumpur		143 mV	
6		<i>wood hydrothermal wastewater (WHTW)</i>	Tunggal	178 mW/m ²	Kloch (2020)
7	<i>S. cereviciae</i>	Glukosa		2.2263,5 mW/m ²	Hamed dkk., (2020)
8	<i>L. bulgaricus</i>	Glukosa	Tunggal	208 mV	Arbianti dkk., (2013)
9	Lumpur aktif	Limbah cair ikan	Seri 2	0,733 V	Ibrahim dkk., (2014)
			Seri 3	0,713 V	
			Seri 4	0,763 V	



asarkan penelitian Ismawati dkk. (2015), yang juga memanfaatkan tiga yaitu glukosa, laktosa dan *whey* tahu menghasilkan masing-masing beda sebesar 33,2 mV/100 mL dan 33,4 mV/100 mL pada jam ke 12, sedangkan

untuk limbah *whey* tahu menghasilkan 33,3 mV/100 mL pada jam ke 15. Perbedaan ini dipengaruhi oleh kekompleksan dari struktur senyawa yang terkandung dalam substrat karena mikroba memerlukan waktu untuk mengurai senyawa kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana. Menurut Kusuma dkk. (2018), glukosa merupakan bentuk gula sederhana sehingga dapat langsung dikonsumsi oleh bakteri, sedangkan laktosa adalah disakarida yang masih membutuhkan waktu bagi bakteri untuk memecah laktosa menjadi glukosa dan galaktosa. Namun pada bakteri *Lactobacillus plantarum*, kecepatan tumbuh pada substrat laktosa tidak jauh signifikan dibanding laktosa.

Bentuk gula yang lebih sederhana akan memudahkan bakteri *Lactobacillus plantarum* untuk dikonsumsi sebagai nutrisi. Besar kecilnya beda potensial yang dihasilkan suatu rangkaian MFCs bergantung pada jumlah sel yang hidup dan memanfaatkan nutrisi dari substrat yang digunakan (Inayati dkk., 2015). Semakin aktif sel mikroba dalam melakukan metabolisme atau aktivitas kehidupan, maka semakin banyak pula elektron bebas yang dihasilkan. Hal ini menandakan bahwa aliran elektron ini menyebabkan terjadinya beda potensial antara anoda dan katoda yang dideteksi oleh peralatan multimeter digital (Ismawati dkk., 2015).

2.7 Peranan Bakteri Asam Laktat

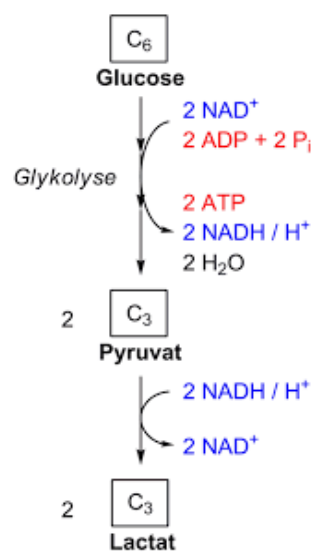
Bakteri Asam Laktat (BAL) merupakan golongan bakteri gram positif, tidak berspora, berbentuk batang maupun bulat dan menghasilkan asam laktat sebagai mayoritas produk akhir pada proses fermentasi. Selain asam laktat, bakteri ini juga menghasilkan zat organik yang memberikan rasa, tekstur dan aroma saat pengujian

optik (Gupta dkk., 2018). BAL dikelompokkan atas 2 grup fermentasi, yaitu fermentatif melalui jalur glikolisis, sedangkan heterofermentatif melalui jalur lase atau 6-fosfoglukonat (Holzapfel dan Wood, 2014):



2.7.1 Jalur Homofermentatif

Jalur homofermentatif merupakan jalur yang digunakan oleh family *Enterococcaceae*, *Lactobacillaceae* dan *Streptococcaceae*, kecuali untuk satu genus *Lactobacillus*. Pada jalur ini, glukosa dikonversi menjadi asam laktat (2 molekul asam laktat per molekul glukosa). Jalur homofermentatif dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Diagram Homofermentatif (Yikrazuul, 2009)

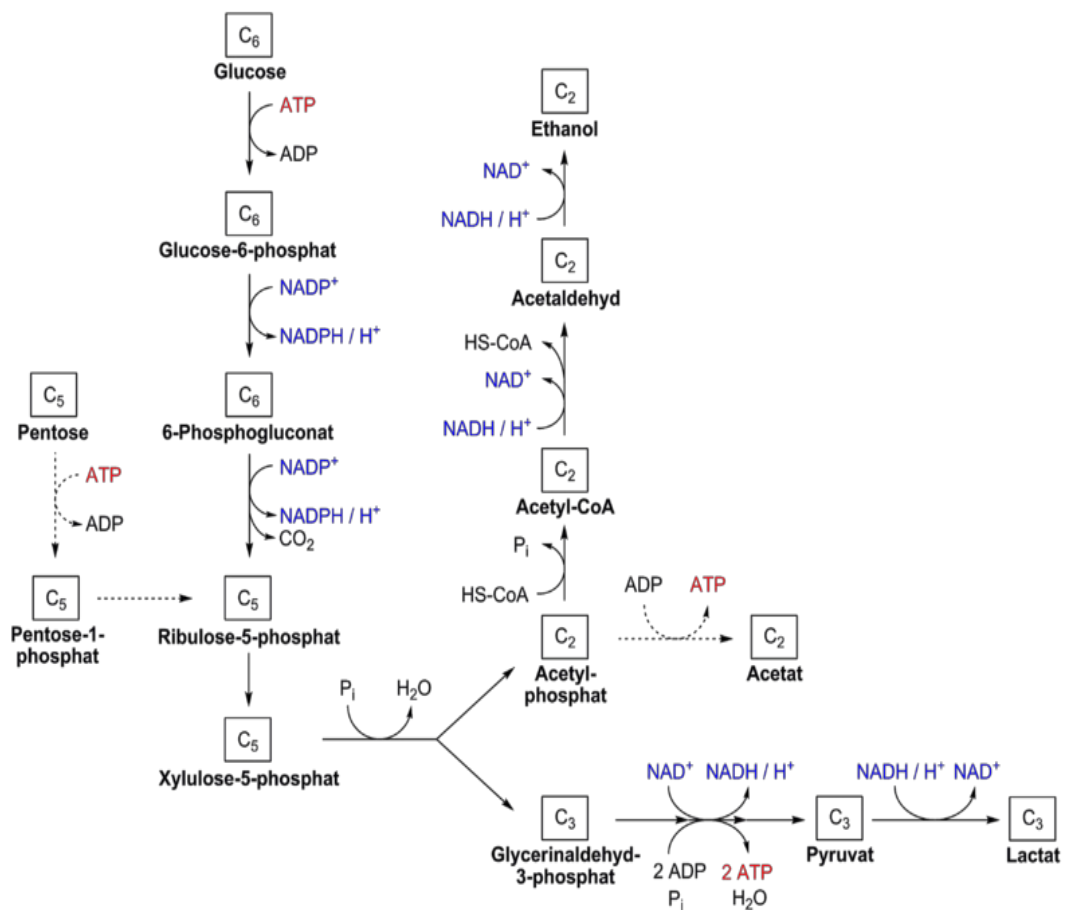
2.7.2 Jalur Heterofermentatif

Jalur ini dilalui oleh family *Leuconostocaceae* dan beberapa spesies genus *Lactobacillus*. Pada jalur ini dihasilkan 1 molekul asam laktat, CO₂ dan etanol dari pemecahan 1 molekul glukosa. Reaksinya ditunjukkan pada gambar 8. Bakteri asam laktat berperan dalam penguraian senyawa organik menjadi asam laktat. Misalnya bakteri *Lactobacillus plantarum* berperan dalam memecah karbohidrat

asam laktat. Dalam proses fermentasi jagung, *Lactobacillus plantarum* akan sukrosa dan laktosa sebagai sumber nutrisi (substrat) dalam lkan energi.



Menurut Murti (2010), bakteri lebih dominan memecah gula sederhana untuk sumber energinya karena hanya diperlukan satu jenis enzim sedangkan untuk memetabolisir polisakarida dibutuhkan dua atau lebih enzim. Lebih lanjut Dwidjoesaputra (2005) mengatakan bahwa enzim yang memecah polisakarida terdiri dari amilase (enzim yang menguraikan amilum menjadi maltosa), maltase (enzim yang menguraikan maltosa menjadi glukosa), sukrase (enzim yang memecah sukrosa menjadi glukosa dan fruktosa), laktase (enzim yang memecah laktosa menjadi glukosa dan galaktosa).



Gambar 8. Diagram Heterofermentatif (Yikrazuul, 2009)



...an bakteri asam laktat dalam fermentasi dilakukan dengan cara
 ...olisis laktosa menjadi asam piruvat, yang selanjutnya akan diubah
 ...asam laktat dan semakin tinggi konsentrasi asam laktat tersebut

menyebabkan pH semakin menurun dan rasa yang semakin asam. Pada penelitian Wulandari (2018) memanfaatkan bakteri *Lactobacillus plantarum* bersama dengan *Sterptococcus Thermophilus* dalam fermentasi laktosa menghasilkan asam laktat. Bakteri asam laktat pada pertumbuhan awal akan menggunakan gula sederhana (monosakarida) sebagai sumber energi sampai semua monosakarida habis, selanjutnya akan disintesis enzim untuk keperluan memecah polisakarida yang kemudian digunakan untuk fase pertumbuhan. Pada penelitian Ainun dkk., (2018), penambahan disakarida berupa sukrosa dan laktosa akan menghasilkan asam laktat yang lebih cepat karena bakteri *Lactobacillus bulgaricus* lebih cepat memecah disakarida dibanding polisakarida yang masih memerlukan waktu untuk mensintesis enzim yang memecah polisakarida tersebut. Adapun beberapa spesies dari genus *Lactobacillus* sp. yang dimanfaatkan dalam proses fermentasi dapat dilihat pada tabel 5 (Ray dan Bhunia, 2014).

Tabel 5. Genus *Lactobacillus* sp. (Ray dan Bhunia, 2014)

Karakteristik	Grup I	Grup II	Grup III
Fermentasi Karbohidrat	Homofermentatif	Fakultatif Heterofermentatif	Heterofermentatif
Produk Akhir Fermentasi	Laktat	Laktat, asetat, etanol, CO ₂ , format	Laktat, asetat, etanol, CO ₂
Contoh spesies	<i>L. delbrueckii</i> ssp. <i>delbrueckii</i> , <i>L. bulgaricus</i> , <i>Lactis</i> <i>L. leichmannii</i> <i>L. acidophilus</i> <i>L. helveticus</i>	<i>L. casei</i> ssp. <i>casei</i> , <i>rhamnosus</i> , <i>pseudoplanatarum</i> <i>L. plantarum</i> <i>L. curvatus</i> <i>L. sake</i>	<i>L. fermentum</i> <i>L. divergens</i> <i>L. kefir</i> <i>L. confuses</i> <i>L. brevis</i> <i>L. sanfrancisco</i> <i>L. reuteri</i>

