

Review: Produksi Asam Laktat Melalui Jalur Biologi dan Jalur Kimia Katalitik Menggunakan Berbagai Bahan Baku

A Review: Lactic Acid Production Through Biological Conversion and Catalytic Chemical Conversion using Various Raw Materials

Apsari Puspita Aini^{a*}, Enny Nurmalasari^a, Carolus Borromeus Rasrendra^b, Johnner Sitompul^b

^aPoliteknik ATI Padang, Jl Bungo Pasang Tabing, Padang, 25171, Indonesia

^bInstitut Teknologi Bandung, Jl Ganesha 10, Bandung, 40132, Indonesia

Artikel histori :

Diterima 24 Mei 2023
Diterima dalam revisi 9 Juli 2023
Diterima 11 Juli 2023
Online 1 November 2023

ABSTRAK: Aplikasi asam laktat pada berbagai industri menarik minat peneliti untuk memproduksi asam laktat melalui berbagai jalur reaksi. Kajian ini akan mengulas produksi asam laktat dari jalur reaksi kimia katalitik maupun jalur biologi dengan berbagai bahan baku. Bahan baku yang digunakan antara lain dihidroksi aseton, gliseraldehid, piruvaldehid, xilosa, glukosa, fruktosa, sukrosa, selulosa, selobiosa, pati, levoglukosan dan lignoselulosa. Pada jalur kimia katalitik, peran katalis baik heterogen maupun homogen terlihat menjadi penentu tercapainya yield asam laktat yang tinggi. Sedangkan pada jalur biologi, mikroorganisme golongan Lactic Acid Bacteria dengan kinerja terbaik dapat menghasilkan asam laktat tinggi. Perolehan isomer asam laktat lebih murni pada jalur biologi, menjadikan jalur reaksi ini banyak dipakai di industri. Sedangkan pada jalur kimia katalitik, para peneliti mencari alternatif katalis yang punya performa terbaik dalam konversi asam laktat dengan waktu reaksi yang lebih singkat dibandingkan jalur biologi. Pemilihan temperatur disesuaikan jenis katalis, menjadi penentu dalam produksi asam laktat. Jenis katalis mulai dari katalis homogen dan heterogen terbukti dapat menghasilkan asam laktat dengan yield yang bervariasi. Produksi asam laktat dari lignoselulosa dengan katalis lanthanum triflate menghasilkan yield yang tinggi. Menggunakan lignoselulosa sebagai bahan baku, memerlukan perlakuan awal sebelum reaksi pembentukan asam laktat guna menghilangkan kandungan lignin sehingga tidak menghalangi kerja katalis.

Kata Kunci: asam laktat; kimia katalitik; katalis; fermentasi; mikroorganisme; lignoselulosa

ABSTRACT: The utilization of lactic acid in various applications encourages researchers to produce lactic acid by various reaction pathways. This study will review the production of lactic acid from catalytic chemical conversion and biological conversion with various raw materials. The raw materials used such as dihydroxy acetone, glyceraldehyde, pyruvaldehyde, xylose, glucose, fructose, sucrose, cellulose, cellobiose, starch, levoglucosan and lignocellulose. In the catalytic chemical conversion, role of heterogeneous and homogeneous catalyst are seen to be a determinant for high lactic acid yield. In the biological conversion, the best microorganism performance from lactic acid bacteria could produce high yield. The pure yield of lactic acid isomer by biological conversion makes it used in industry. Meanwhile, researchers are looking for alternative catalysts which have the best performance in lactic acid conversion with a shorter reaction time compared to biological. The temperature selection is also a determinant in the production of lactic acid. The catalyst types are proven to produce lactic acid with varying yields. Production of lactic acid from lignocellulosic with lanthanum triflate seems to produce high yield. Lignocellulosic as raw material requires pre-treatment before the lactic acid reaction, to remove the lignin so that it doesn't hinder the performance of the catalyst.

Keywords: lactic acid; catalytic chemical; catalyst; fermentation; microorganism; lignocellulose

* Corresponding Author: +62822 1344 8765; fax: -
Email: apsariuspitaaini@poltekatipdg.ac.id

1. Pendahuluan

Asam laktat, $\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$, atau juga disebut asam hidroksi karboksilat, mempunyai dua isomer optik aktif, yaitu asam L-(+)-laktat atau asam (S)-laktat dan cerminannya, asam D-(-) laktat atau asam (R)-laktat (Datta and Henry, 2006). Asam laktat merupakan asam organik yang sangat luas aplikasinya dalam berbagai industri seperti industri farmasi, kosmetik, plastik *biodegradable*, makanan dan minuman, dan sebagai bahan kimia dasar untuk industri kimia lainnya (Alsaheb et al., 2015; Chin et al., 2016; Ponchai et al., 2020; Samsudin & Iniguez-Franco, 2022; Tang et al., 2014). Pada industri kimia asam laktat digunakan untuk produksi ester laktat, propilen glikol, 2,3 pentanadion, dan asam propanoate. Sedangkan di industri kosmetik, asam laktat digunakan untuk humektan pada preparasi lotion dan sabun. Humektan berfungsi untuk melembabkan kulit (Gómez-Gómez et al., 2015). Beberapa tahun terakhir, minat peneliti terhadap pembuatan plastik ramah lingkungan dari *Polylactic Acid* (PLA) menjadi salah satu penyebab meningkatnya permintaan asam laktat di pasar dunia. Grand View Research menyebutkan bahwa pada tahun 2028 diperkirakan mencapai 2.695,6 kiloton, melonjak pada CAGR sebesar 7,2% dari tahun 2021 hingga 2028. Penggunaan PLA pada produk kecantikan dan perawatan tubuh diproyeksikan akan memacu ekspansi industri selama beberapa periode (Grand View Research, 2021).

Produksi asam laktat dapat dilakukan dengan cara fermentasi menggunakan mikroorganisme atau dengan reaksi kimia. Dalam skala industri, produk asam laktat yang dilakukan dengan fermentasi inilah yang banyak dipakai, hal ini karena asam laktat yang dihasilkan dari proses fermentasi mempunyai kemurnian yang tinggi, baik itu D-asam laktat maupun L-asam laktat. Alasan lainnya adalah proses fermentasi termasuk proses yang sederhana, dapat dilakukan pada kondisi tekanan dan temperatur yang rendah, konsumsi energi sedikit serta lebih ramah lingkungan. Namun kekurangan dari jalur fermentasi adalah memerlukan waktu reaksi lebih dari 48 jam, serta perlu penanganan ekstra saat proses berlangsung karena memakai mikroorganisme (Alrumman, 2016; Tsapekos et al., 2020; Y. Wang et al., 2013). Karena hal tersebut, pembuatan asam laktat dengan reaksi kimia menarik minat banyak peneliti karena waktu reaksi yang diperlukan lebih singkat walaupun untuk mendapatkan asam laktat dengan kemurnian tinggi perlu proses pemisahan lanjutan karena kecenderungan produksi asam laktat dengan reaksi kimia adalah dapat menghasilkan produk asam organik lainnya sebagai produk samping. Pada kajian ini akan dibahas mengenai produksi asam laktat baik dilakukan dengan proses fermentasi maupun proses kimia beserta keuntungan dan kerugian dari kedua proses.

2. Asam Laktat

2.1 Produksi Asam Laktat Jalur Fermentasi

Asam laktat pertama kali ditemukan oleh kimiawan Swedia bernama Carl Wilhelm Scheele, dalam susu pada tahun 1780. Asam laktat diproduksi secara komersial oleh Charles E. Avery di Littleton, Massachusetts, USA pada tahun 1881. Produksi asam laktat di industri didominasi dengan cara fermentasi dengan menggunakan berbagai mikroorganisme. Adapun metode fermentasi yang digunakan adalah dengan metode *batch*, *fed-batch*, ataupun kontinyu. Bahan baku untuk produksi asam laktat bervariasi mulai dari gula sederhana seperti glukosa, xilosa, serta lignoselulosa yang diberi perlakuan awal sebelum proses fermentasi. Berikut ini adalah ringkasan penelitian terdahulu dalam produksi asam laktat dengan jalur fermentasi.

Pembuatan asam laktat dengan bahan baku gula C_6 atau gula C_5 sudah dilakukan oleh banyak peneliti. Beberapa diantaranya ditampilkan pada Tabel 1. Novy et al. (2018) melaporkan bahwa yield asam laktat yang diperoleh sebesar 0,67 g/g untuk bahan baku glukosa dengan mikroorganisme *S.cerevisiae strain IBB14LA1_5*. Sedangkan untuk substrat xilosa diperoleh yield asam laktat sebesar 0,80 g/g. Produksi asam laktat dari gula sederhana seharusnya menghasilkan yield asam laktat yang tinggi, hal ini dikarenakan jalur reaksi yang ditempuh lebih pendek jika dibandingkan dengan bahan baku selulosa. Namun hal itu tampaknya tidak berlaku sepenuhnya. Mikroorganisme yang dipakai sangat mempengaruhi perolehan asam laktat. Penelitian yang dilakukan oleh Novy et al. (2018) menunjukkan bahwa yield asam laktat yang diperoleh lebih rendah dari bahan baku lignoselulosa yang telah dilakukan oleh penelitian sebelumnya. Yield asam laktat sebesar 0,8 g/g diperoleh dari bahan baku xilosa, dan 0,67 g/g dari bahan baku glukosa. Hal ini menunjukkan kinerja mikroorganisme *Saccharomyces cerevisiae* kurang optimal dibandingkan dengan kinerja *Lactobacillus paracasei*, *L. coryniformis*, *L. coryniformis*, *Escheria coli* ataupun *Enterococcus mundtii*.

Lunelli et al. (2010) melakukan penelitian produksi asam laktat menggunakan bahan baku molase dengan mikroorganisme *Lactic acid bacteria* (LAB) yang diisolasi dari industri etanol. Fermentasi dilakukan dari fermentasi batch, temperatur 34°C pada konsentrasi awal sukrosa 12 g/L selama 50 jam. Yield asam laktat yang diperoleh adalah 0,83 g/g, dengan produktivitas 2,49 g/L.h. Kemudian, Kuo et al. (2015) melakukan penelitian menggunakan limbah serbuk kayu dan sekam padi sebagai bahan baku, serta menggunakan *Lactobacillus paracasei* untuk menghasilkan asam laktat. Fermentasi dilakukan dengan metode *fed-batch* dengan waktu reaksi 24 jam, temperatur 37°C. Yield asam laktat yang diperoleh adalah 0,96 g/g dengan konsentrasi asam laktat sebesar 215 g/L. Sebelum dilakukan fermentasi, limbah serbuk kayu dan sekam padi diberi perlakuan awal menggunakan metode *steam explosion* dengan larutan asam pada temperatur 160-190°C dan kemudian dilanjutkan dengan hidrolisis enzimatik

memakai *Novozyme celtic CTec2* selama 24 jam pada temperatur 50°C.

Tabel 1. Produksi Asam Laktat dengan Jalur Fermentasi

Bahan Baku	Mikroorganisme	Metode Fermentasi	Temperatur (°C)	Waktu (jam)	Yield (g/g)	Penulis
Glukosa	<i>S.cerevisiae</i> strain IBB14LA1_5	Batch	30	50	0,18	(Novy et al., 2018)
Glukosa	<i>S.cerevisiae</i> strain IBB14LA1_5	Batch	30	140	0,67	(Novy, et al., 2018)
Glukosa	Alkaliphilic LAB	Fed batch	40	276	0,98	(Abdel-Rahman et al., 2011)
Glukosa	Polyvinyl Alcohol (PVA) immobilized <i>L. plantarum</i>	Continuous	30	160	0,98	(Nandini et al., 2020)
Xilosa	<i>S.cerevisiae</i> strain IBB14LA1	Batch	30	140	0,27	(Novy et al., 2018)
Xilosa	<i>S.cerevisiae</i> strain IBB14LA1_5	Batch	30	120	0,80	(Novy et al., 2018)
Molase	Lactic Acid Bacteria strain dari industri Etanol	Batch	34	50	0,83	(Lunelli et al., 2010)
Limbah serbuk kayu Lanjutan Tabel 1	<i>Lactobacillus paracasei</i>	Fed batch	37	120	0,96	(Kuo et al., 2015)
padi						
Hidrolisat Ekstrak Aloe Vera	<i>Thermoanaerobacter</i> sp.	Batch	65	26	0.175 g/l.h	(Gómez-Gómez et al., 2015)
Limbah roti dari sisa bahan baku bioetanol	<i>Lactobacillus rhamnosus</i>	Batch	41	36	0.91	(Djukić-Vuković et al., 2016)
Hidrolisat kayu non-detoksifikasi	<i>Lactobacillus paracasei</i> 7BL	Fed-batch	37	120	0.96	(Kuo et al., 2015)
Daun, pangkal daun, dan serat tanaman kurma	<i>Lactobacillus delbrueckii</i> subsp. <i>Lactis</i> (B. 01357)	Batch	50	72	0,76	(Alrumman, 2016)
Residu pabrik kertas	<i>L. coryniformis</i>	Batch	37	20	0,97	(de Oliveira Moraes et al., 2016)
Hidrolisat ampas tebu	<i>Eschericia Coli</i> strain JU15	Batch	37	72	1,11	(Utrilla et al., 2016)
Hidrolisat bonggol jagung	<i>Eschericia Coli</i> JU15	Batch	37	72	1,3	(Utrilla et al., 2016)
Ampas tebu	<i>Lactobacillus pentosus</i>	Batch	37	60	0,93	(Wischrall et al., 2019)
Ampas singkong	<i>Lactobacillus rhamnosus</i> dan <i>Bacillus coagulans</i>	Batch	50	13	0.88	(Chen et al., 2020)
Sampah perkotaan, supermarket, sisa makanan	<i>Lactobacillus delbrueckii</i>	Batch	37	48	0,72	(Tsapekos et al., 2020)
<i>Chlorella vulgaris</i> sp	Polyvinyl Alcohol (PVA) immobilized <i>L. plantarum</i>	Continuous	30	160	0,91	(Nandini et al., 2020)
Residu pertanian	<i>Lactobacillus casei</i>	Batch	37	70.5	0,84	(Krull et al., 2020)
Limbah cair pulp	<i>Enterococcus mundtii</i> DSM 4838	Fed batch	37	49	1	(Hoheneder et al., 2021)

Sumber lignoselulosa lainnya yang diteliti oleh Alrumman (2016) adalah daun, pangkal daun dan serat dari tanaman kurma. Sebelum digunakan sebagai bahan baku untuk produksi asam laktat, bahan baku dilakukan pretreatment awal terlebih dahulu, yaitu dengan metode pretreatment dengan NaOH pada 30°C selama 48 jam. Dari pretreatment tersebut didapatkan bahwa alkali treatment memberikan efek presentase selulosa, hemiselulosa dan

lignin yang lebih baik dibandingkan dengan perlakuan asam. Alkali treatment menyebabkan senyawa selulosa mengembang sehingga meningkatkan luas area dalam, mengurangi derajat polimerisasi dan kristalinitas, menyebabkan pemisahan pada ikatan struktur lignin dan karbohidrat, serta merusak struktur lignin. Kemudian tahapan penelitian dilanjutkan dengan proses sakarifikasi. Sakarifikasi dengan enzim selulase dilakukan pada

temperatur 50°C dan pH 5, dengan waktu reaksi 24 jam. Proses kemudian dilanjutkan dengan fermentasi selama 72 jam dengan temperatur 50°C. Mikroorganisme yang dipakai adalah *Lactobacillus delbrueckii subsp. Lactis* (B.1357) yang merupakan produsen homofermentasi. Asam laktat yang diperoleh adalah 27,8 mg/ml, dengan yield asam laktat dari glukosa sebesar 76,45% dan produktivitas 0,386 g/L/h.

De Oliveira Moraes et al. (2016) melakukan penelitian pembuatan asam laktat menggunakan sumber selulosa dari limbah pabrik kertas. Fermentasi dilakukan dalam bioreaktor dengan volume reaksi 1,1 L dan 10% v/v inokulum dengan metode anaerobik. Total waktu fermentasi selama 20 jam, dimana sampling dilakukan setiap 4 jam sekali untuk menganalisa sel biomasa dan lainnya. Temperatur fermentasi yang dipakai adalah 37°C, agitasi 120 rpm, dan pH 6,5, yang menghasilkan 57,18 g/L asam laktat, yield 0,97 g/g dan produktivitas sebesar 2,8 g/L/h.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Hoheneder et al. (2021) mampu menghasilkan yield asam laktat sempurna yaitu 1 g/g dengan bahan baku limbah *pulp* dan mikroorganisme *Enterococcus mundtii*. Dari Tabel 1 terlihat bahwa waktu reaksi fermentasi paling pendek adalah dari penelitian yang dilakukan oleh de Oliveira Moraes et al. (2016). Asam laktat yang diperoleh adalah sebesar 57 g/L selama fermentasi 20 jam dengan yield 0,97 g/g. Kemudian penelitian lain yang menghasilkan asam laktat tinggi adalah penelitian Hoheneder (2021). Penelitian tersebut berhasil melakukan fermentasi selama 49 jam dengan yield asam laktat 1 g/g menggunakan *Enterococcus mundtii* dengan bahan baku limbah cair *pulp*.

Bahan baku lignoselulosa lain yang digunakan untuk bahan baku asam laktat adalah hidrolisat ekstrak Aloe vera. Fermentasi dilakukan menggunakan mikroorganisme menggunakan *Thermoanaerobacter sp.* Sebelum dilakukan fermentasi, terlebih dahulu Aloe vera dihidrolisis dengan metode hidrolisis *enzymatic*. Kondisi operasi hidrolisis yakni 50°C, selama 8 jam. Fermentasi dilakukan selama 26 jam. Variasi terhadap ekstrak aloe vera (AHE) meliputi AHE tanpa diberi suplemen (*yeast extract* dan nutrisi lainnya), AHE diberi suplemen 3:1 dan tambahan MnCl₂, serta AHE diberi suplemen 3:1. Perolehan asam laktat tertinggi dicapai oleh AHE diberi suplemen 3:1, sebesar 93.3 mM atau 0.175 g/l.h (Gómez-Gómez et al., 2015).

Djukić-Vuković et al. (2016) mempelajari faktor lain yang bisa mempengaruhi tingginya konsentrasi asam laktat selain konsentrasi glukosa pada substrat. Penelitian ini menggunakan 3 jenis bahan baku untuk fermentasi asam laktat. Ketiga bahan baku tersebut diambil dari sisa produksi bioetanol, yaitu limbah roti, limbah kentang, dan hidrolisat biji-bijian bahan baku bir. Pada bahan limbah roti dan limbah kentang, ditambahkan 50% w/w larutan glukosa ke dalamnya untuk mengatur konsentrasi gula awal yang rendah akibat proses bioetanol yang efektif. Konsentrasi gula diatur sebanyak 50 g/L untuk media fermentasi. Mikroorganisme yang dipakai adalah *Lactobacillus rhamnosus*. Untuk bahan baku hidrolisat

biji-bijian bahan baku bir, dilakukan preparasi enzimatik untuk proses hidrolisisnya. Setelah proses hidrolisis, hidrolisat didinginkan dan disentrifugasi, kemudian fraksi cairnya ditambahkan larutan glukosa untuk menaikkan konsentrasi hingga 50 g/L, dan pada akhirnya digunakan untuk fermentasi. Fermentasi dilakukan selama 48 jam, dengan pH dijaga 6,5 dan temperatur 41°C. Konsentrasi asam laktat dicapai hingga konsentrasi diatas 45 g/L untuk kedua bahan baku limbah roti dan limbah kentang. Sedangkan hidrolisat biji-bijian menghasilkan asam laktat yang rendah yaitu 19,49 g/L setelah 48 jam fermentasi. Karena konsentrasi gula awal yang dimiliki oleh semua bahan baku sama, sehingga faktor lain yang mempengaruhi tinggi rendahnya perolehan asam laktat adalah kandungan alfa amino nitrogen pada media fermentasi. Yield asam laktat pada bahan baku limbah roti merupakan yang tertinggi yaitu 0,91 g/g, kemudian diikuti oleh limbah kentang 0,81 g/g, dan terakhir hidrolisat biji-bijian 0,34 g/g, setelah 36 jam fermentasi. Dari hasil analisa bahan baku, terlihat bahwa kandungan alfa amino nitrogen untuk limbah roti adalah paling tinggi yaitu 236,8 mg/L lalu diikuti oleh limbah kentang sebanyak 190,46 mg/L dan hidrolisat biji-bijian sebanyak 64,21 mg/L.

Chen et al. (2020) melakukan penelitian produksi asam laktat menggunakan bahan baku ampas singkong. Komposisi ampas singkong adalah pati dan lignoselulosa. Metode yang digunakan adalah dengan sakarifikasi simultan dan ko-fermentasi. Proses sakarifikasi menggunakan *cocktail* enzim. Sedangkan mikroorganisme yang digunakan adalah campuran *Lactobacillus rhamnosus* dan *Bacillus coagulans*. Yield asam laktat yang diperoleh adalah 0,88 g/g, dengan konsentrasi 112,5 g/L dan produktivitas 2,74 g/Lh. Sebelum dilakukan fermentasi, terlebih dahulu dilakukan liquifaksi menggunakan enzim amilase. Supernatannya lalu digunakan untuk bahan baku fermentasi, dengan enzim glukamilase. Pada saat menggunakan *Lactobacillus rhamnosus*, kondisi operasi yang digunakan adalah pH 6,5 temperatur 50°C, selama 13 jam. Setelah itu ditambahkan *B. coagulans* ke dalam tangki fermentasi, dimana kondisi operasinya berubah menjadi 42°C sampai pH akhir mencapai 6,8 selama 8 jam.

Dari beberapa bahan baku gula sederhana hingga lignoselulosa yang tertera pada Tabel 1, terlihat bahwa produksi asam laktat yang paling baik ditunjukkan pada penelitian Utrilla et al. (2016) dengan bahan baku hidrolisat ampas tebu dan bonggol jagung. Fermentasi menggunakan bahan ampas tebu menghasilkan yield asam laktat sebesar 1,11 g/g, produktivitas 0,98 g/L/h dengan waktu reaksi total selama 72 jam menggunakan *E. Coli*. Sedangkan yield asam laktat yang diperoleh dari fermentasi bonggol jagung adalah 1,3 g/g. Dari Tabel 1 terlihat bahwa proses fermentasi asam laktat banyak dilakukan pada sistem batch, dengan temperatur berkisar dari 30–65°C tergantung dari ketahanan mikroorganisme yang dipakai.

Dalam tulisan yang dilaporkan oleh Yankov (2022), setidaknya ada tiga hal yang menjadi masalah utama pada produksi asam laktat jalur fermentasi, yaitu

- tahap perlakuan awal: kesulitan dalam memisahkan kandungan lignin secara sempurna sebelum dilakukan fermentasi. Lignin dapat menghambat mikroorganisme dalam mengakses gula yang terdapat pada bahan baku. Hal lainnya adalah konsumsi energi, toksisitas, dan masalah lingkungan dalam penanganan bahan kimia yang digunakan, menghilangkan senyawa inhibitor, serta biaya tinggi dalam enzimatis hidrolisis
- tahap fermentasi: kebutuhan nutrisi yang diperlukan bakteri asam laktat selama proses fermentasi, represi katabolit karbon, inhibisi bahan baku dan produk, serta pembentukan produk samping dalam hetero-fermentasi.
- tahap pemisahan dan pemurnian: konsentrasi produk yang rendah saat pemisahan, komposisi fermentasi yang lebih kompleks dibandingkan dengan produksi asam laktat generasi pertama, tingginya biaya proses hilir, kesulitan dalam pemisahan produk untuk generasi kedua, serta masalah yang timbul pada lingkungan.

2.2 Produksi Asam Laktat Jalur Reaksi Kimia

Lebih dari 90% asam laktat komersial yang ada sekarang adalah dari produk fermentasi. Waktu reaksi yang relatif lama, laju reaksi yang masih rendah, konsumsi energi yang tinggi dan sejumlah besar limbah yang dihasilkan selama proses netralisasi membuat banyak peneliti tertarik untuk memproduksi asam laktat dengan jalur reaksi kimia yaitu dengan menggunakan katalis (Aini et al., 2018; Ponchai et al., 2020). Produksi asam laktat secara kimia katalitik menarik banyak minat peneliti karena mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan jalur fermentasi. Katalis homogen maupun heterogen menjadi agen yang dapat mempercepat dan mengarahkan reaksi pembentukan asam laktat. Berbagai bahan baku telah dipakai oleh para peneliti untuk memproduksi asam laktat. Ringkasan penelitian asam laktat ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Produksi Asam Laktat dengan Jalur Kimia Katalitik dari Berbagai Bahan Baku

Bahan Baku	Katalis	Pelarut	Temperatur (°C)	Tekanan	Waktu (menit)	Yield (%)	Penulis
DHA	SnCl ₂ dan SnCl ₄ .5H ₂ O	metanol	90	-	180	89	(Hayashi & Sasaki, 2005)
DHA	ZnSO ₄	H ₂ O	300	25 MPa		86	(Bicker et al., 2005)
DHA	H-USY-zeolit	metanol	160	-	1440	99	(Taarning et al., 2009)
DHA	AlCl ₃	H ₂ O	140	-	90	98	(Rasrendra et al., 2011)
DHA	Sn-MCM 41	etanol	90	-	360	98	(Li et al., 2011)
DHA	Er(OTf) ₃	H ₂ O	240	2 Mpa (N ₂)	30	98,2	(Y. Wang et al., 2013)
GLI	ZnSO ₄	H ₂ O	300	25 MPa	tidak diketahui	75	(Bicker et al., 2005)
PRV	Ba(OH) ₂	H ₂ O	220	-	480	64	(Esposito & Antonietti, 2013)
Xil	Pt/C	H ₂ O*	80	-	120	27	(Onda et al., 2008)
Xil	ZrO ₂	H ₂ O	200	2,4 Mpa (N ₂)	40	73,7	(Yang et al., 2015)
Xil	ZrO ₂	H ₂ O	200	2,4 MPa (N ₂)	90	26	(Yang et al., 2015)
Xil	Pb ²⁺	H ₂ O	210	-	120	55,29	(Chin et al., 2016)
Xil	La(OTf) ₃	H ₂ O	250	20 bar (N ₂)	60	61	(Liu et al., 2018)
Xil	Zr-based UiO-66	H ₂ O	170	15 bar (N ₂)	240	98,26	(Ponchai et al., 2020)
Glu	Cu/C	larutan NaOH	80	-	120	56	(Onda et al., 2008)
Glu	NaOH	H ₂ O	300	8,6 MPa	1	27	(Yan et al., 2010)
Glu	Ca(OH) ₂	H ₂ O	300	8,6 MPa	1	20	(Yan et al., 2010)
Glu	Ba(OH) ₂	H ₂ O	220	-	720	53	(Esposito & Antonietti, 2013)
Glu	ZnSO ₄	H ₂ O	300	25 MPa	3	42	(Bicker et al., 2005)
Glu	Pb ²⁺	H ₂ O	210	hidrotermal	120	28	(Chin et al., 2016)
Glu	Er(OTf) ₃	H ₂ O	240	2 MPa (N ₂)	30	48	(Y. Wang et al., 2013)
Glu	Pt/Al ₂ O ₃	H ₂ O*	80	hidrotermal	120	57	(Onda et al., 2008)
Glu	La(OTf) ₃	H ₂ O	250	20 bar (N ₂)	60	74	(Liu et al., 2018)
Fru	Er(OTf) ₃	H ₂ O	240	2 MPa	30	55	(Y. Wang et al., 2013)
Fru	Pt/C	H ₂ O*	80	hidrotermal	120	48	(Onda, 2014)
Fru	ZnSO ₄	H ₂ O	300	25 MPa	3	48	(Bicker et al., 2005)
Suk	Er(OTf) ₃	H ₂ O	240	2 MPa	30	52	(Y. Wang et al., 2013)
Suk	Sn-β	Meth**	160	N/A	1200	64	(Holm et al., 2010)
Sel	AlCl ₃	H ₂ O	180	10,3 atm	180	19,38	(Sitompul et al., 2014)
Sel	Pb ²⁺	H ₂ O	190	3 MPa (N ₂)	240	68	(Y. Wang et al., 2013)
Sel	Al ³⁺	H ₂ O	190	3 MPa (N ₂)	240	38	(Y. Wang et al., 2013)
Sel	Zn ²⁺	H ₂ O*	300	hidrotermal	5	28	(Zhang et al., 2011)
Sel	Ni ²⁺	H ₂ O*	300	hidrotermal	5	17,5	(Zhang et al., 2011)
Sel	C	H ₂ O*	300	hidrotermal	5	16,4	(Zhang et al., 2011)

Bahan Baku	Katalis	Pelarut	Temperatur (°C)	Tekanan	Waktu (menit)	Yield (%)	Penulis
Sel	Zn ²⁺ , Ni ²⁺ , C	H ₂ O*	300	hidrotermal	5	42,15	(Zhang et al., 2011)
Sel	VOSO ₄	H ₂ O [#]	160	2 MPa (N ₂)	120	54	(Tang et al., 2014)
Sel	Er(OTf) ₃	H ₂ O	260	2 MPa (N ₂)	30	89,6	(Y. Wang et al., 2013)
Sel	AIW	H ₂ O	190	5 MPa (N ₂)	1440	28	(Chambon et al., 2011)
Sel	ErCl ₃ + K10	H ₂ O	240	2 MPa (N ₂)	1440	69,8	(F. F. Wang et al., 2015)
Sel	Al ₂ (WO ₄) ₃	H ₂ O	220		180	46	Shi et al., 2019
Insulin	Er(OTf) ₃	H ₂ O	260	2 MPa (N ₂)	30	52,5	Wang et al., 2013
Selo	Er(OTf) ₃	H ₂ O	260	2 MPa (N ₂)	30	53	Wang et al., 2013
Pati	Er(OTf) ₃	H ₂ O	260	2 MPa (N ₂)	30	48,9	Wang et al., 2013
Levogluconan	La(OTf) ₃	H ₂ O	250	20 bar (N ₂)	60	75	Liu et al., 2018
Ligno	AlCl ₃	H ₂ O	230	27,97 atm	180	8,33	Sitompul et al., 2014
Ligno	Pb ²⁺	H ₂ O	230	hidrotermal	240	46,5	Chien et al., 2016
Ligno*	Ba(OH) ₂	H ₂ O	240	hidrotermal	240	21,55	Aini et al., 2018
Ligno [#]	La(OTf) ₃	H ₂ O	250	500 psi	240	78,4	Kim et al., 2020

DHA: Dihidroksi Aseton,
Fru: Fruktosa,
GLI: Gliseraldehid,
Gala: Galaktosa,
PRV: Pirivaldehid,
Suk: Sukrosa,

Glu: Glukosa,
Sel: Selulosa,
Ins: Insulin,
Selo: Selobiosa,
Xil: Xilan,
Ligno: Lignoselulosa

Meth: Methanol
N/A: tidak diketahui
* dengan penambahan NaOH,
dengan perlakuan ballmill
** dengan penambahan naftalein,

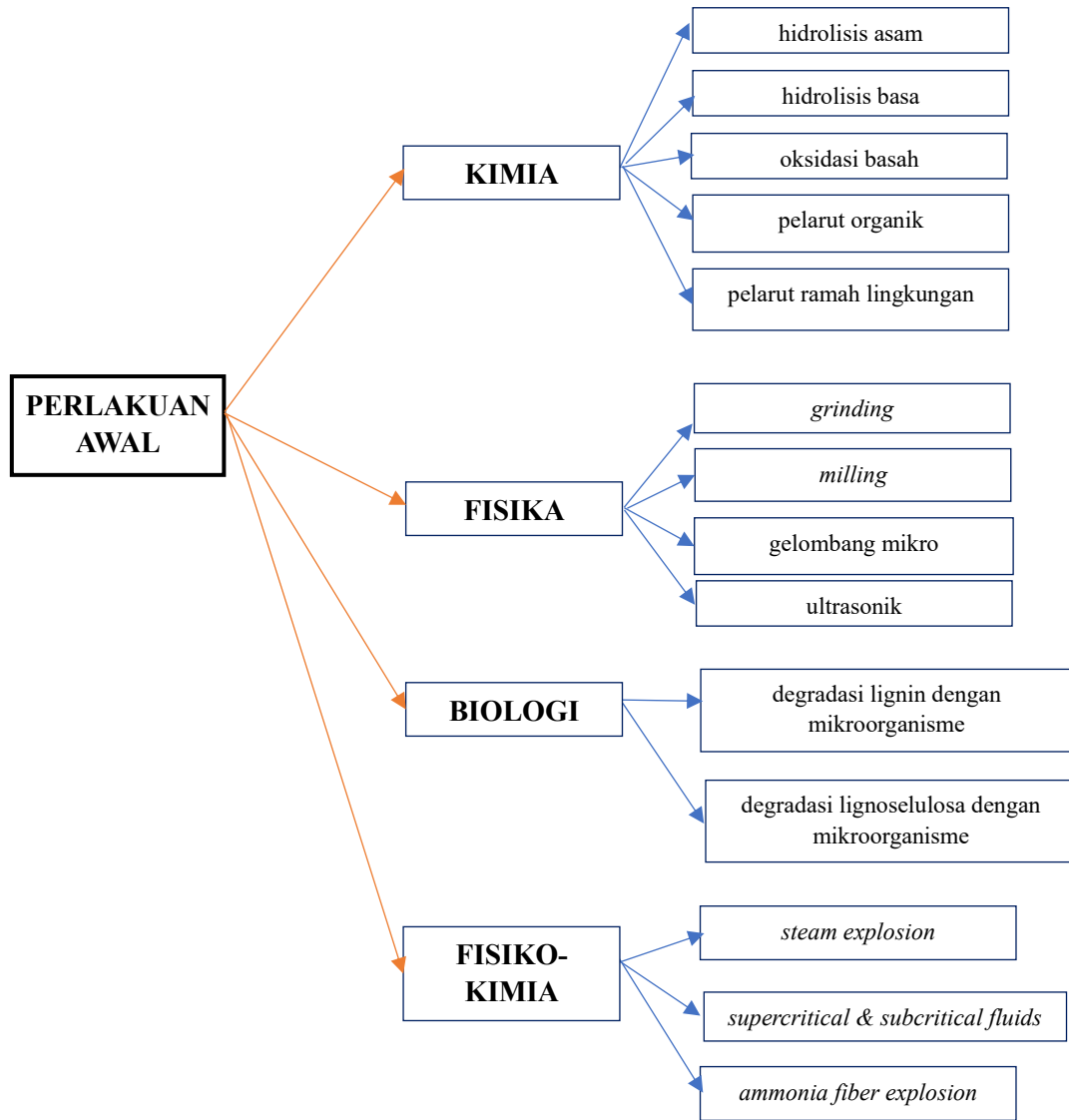
Produksi asam laktat secara kimia katalitik dapat diperoleh dari bahan baku dihidroksi aseton, gliseraldehid, pirivaldehid, glukosa, xilosa, fruktosa, sukrosa, selulosa, selobiosa, insulin, pati, levogluconan, lignoselulosa. Bahan baku yang paling sederhana yaitu dihidroksi aseton (DHA), gliseraldehid (GLY), dan pirivaldehid (PRV). Berikut ini adalah jalur reaksi produksi asam laktat dari glukosa kemudian diurai menjadi DHA, GLY, dan PRV hingga akhirnya menjadi asam laktat (LA). Semakin kompleks bahan baku yang dipakai, maka dibutuhkan perlakuan awal terlebih dahulu untuk merubahnya menjadi gula sederhana.

Perlakuan awal yang dilakukan bisa dengan jalur kimia, fisika, biologi dan fisiko-kimia. Metode-metode dalam perlakuan awal ditampilkan pada Gambar 1. Pada perlakuan awal jalur kimia, beberapa metode dapat dilakukan seperti dengan hidrolisis asam menggunakan asam kuat maupun asam lemah, hidrolisis dengan basa seperti NaOH dan NH₄OH, oksidasi basah, perlakuan dengan pelarut organik, serta pelarut ramah lingkungan seperti ionic liquids. Sedangkan dengan cara fisika, biomassa dapat melalui perlakuan pengecilan ukuran seperti *grinding*, *milling*, diberi gelombang mikro ataupun gelombang ultrasonik. Sedangkan dengan metode biologi, baik untuk degradasi lignin maupun degradasi selulosa harus menggunakan mikroorganisme tertentu. Dan penggolongan perlakuan awal yang terakhir adalah gabungan antara jalur fisika dan kimia, yang disebut fisiko-kimia, seperti *steam explosion*, *ammonia fiber explosion* serta *supercritical and subcritical fluids*. *Steam explosion*

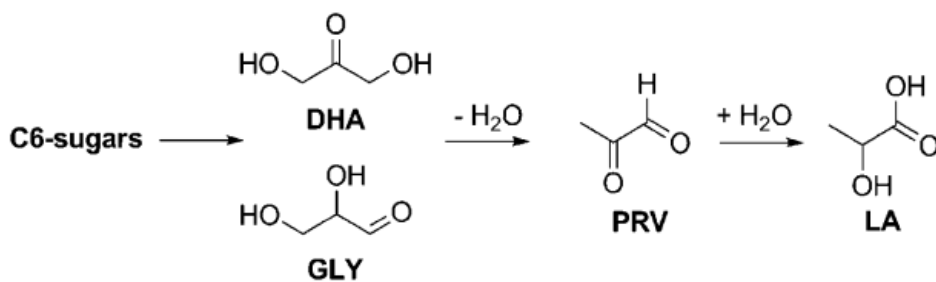
pada penerapannya lebih banyak digunakan. Hal ini karena biomassa yang semula mempunyai struktur kristalin, dengan adanya ekspansi tekanan, strukturnya dapat berubah menjadi amorf, sehingga lebih mudah diakses oleh mikroorganisme pembentuk asam laktat maupun oleh katalis kimia.

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa yield asam laktat yang diperoleh dari bahan baku DHA lebih besar dibandingkan bahan baku lainnya, berkisar lebih dari 86%, dan banyak yang mencapai 98-99%. Hal ini dikarenakan DHA merupakan senyawa dengan atom C₃ yang paling sederhana untuk membentuk LA. Dengan mempertimbangkan waktu reaksi untuk membentuk asam laktat, penelitian yang dilakukan oleh Rasrendra et al. (2011) merupakan penelitian yang paling baik karena bisa mencapai yield 99% dengan waktu reaksi 90 menit dan temperatur 140°C. Kinerja katalis AlCl₃ merupakan kinerja katalis terbaik jika dibandingkan logam-logam lain seperti MgCl₂, FeCl₃, CuSO₄, CoSO₄ dan CrCl₂. Katalis AlCl₃ dan Cr merupakan katalis yang menghasilkan yield asam laktat terbaik jika dibandingkan dengan logam lain yang mempunyai yield dibawah 30%. Katalis AlCl₃ lebih aman dan murah jika dibandingkan dengan logam Cr.

Produksi asam laktat dilanjutkan dengan mencoba bahan baku lain yaitu gula C₅ (xilosa) dan C₆ (glukosa). Adapun jalur reaksi pembentukan asam laktat dari C₆ (glukosa) ditampilkan pada Gambar 2 dan Gambar 3. Penelitian yang dilakukan oleh Chin et al. (2016); Liu et al. (2018); Onda et al. (2008); Yang et al. (2015) belum menunjukkan yield asam laktat yang optimal dengan katalis yang digunakan, dimana yield asam laktat tertinggi yaitu 73,7 menggunakan katalis ZrO₂ oleh Yang et al. (2015).



Gambar 1. Klasifikasi Metode Perlakuan Awal Biomassa (Yankov, 2022)

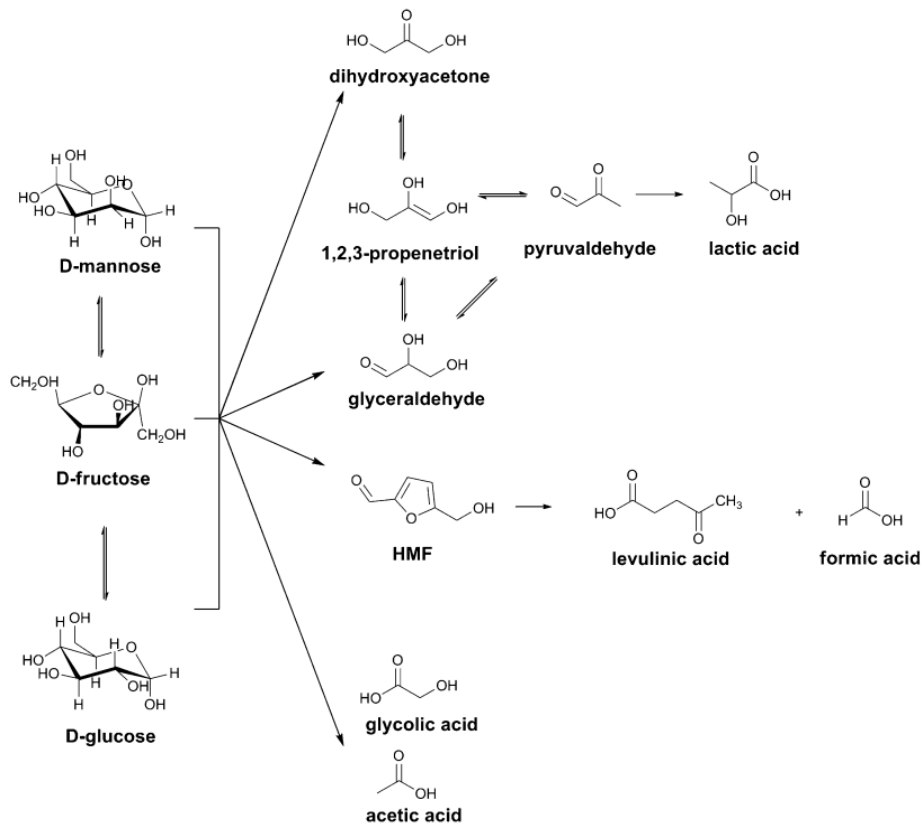


Gambar 2. Jalur Reaksi Glukosa menjadi Asam Laktat (Rasrendra et al., 2011)

Kisaran yield asam laktat paling tinggi diperoleh dari penelitian yang dilakukan Ponchai et al. (2020) menggunakan katalis Zr-based UiO-66, dengan yield 98,26%. Reaksi dikatalisis oleh koordinat tak jenuh Zr^{4+} , sebagai situs asam Lewis, dan ion hidroksida (OH^-) yang

terletak disitus yang diserang. Selanjutnya produksi asam laktat dari glukosa memperoleh yield dari 20% dengan menggunakan katalis basa $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 27% katalis NaOH , dan 53% dengan katalis $\text{Ba}(\text{OH})_2$. Peningkatan asam laktat

terjadi ketika menggunakan katalis $\text{La}(\text{OTf})_3$ pada penelitian yang dilakukan oleh Liu et al. (2018).



Gambar 3. Jalur reaksi pembentukan asam laktat beserta asam organik lainnya dari d-glukosa dengan adanya garam anorganik (Rasrendra et al., 2010)

Dalam produksi asam laktat dengan bahan baku gula C_6 seperti fruktosa, asam laktat yang diperoleh adalah 48-55% dengan memakai katalis ZnSO_4 , Pt/C, dan $\text{Er}(\text{OTf})_3$. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Bicker tahun 2005 menggunakan katalis ZnSO_4 , dijelaskan bahwa $\text{Zn}(\text{II})$ berfungsi dalam reaksi kondensasi dan hidrolisis. Hal itu karena sifat lewis acid $\text{Zn}(\text{II})$ mempolarisasi substrat. Sebaliknya pengembalian polaritas Lewis acid $\text{Zn}(\text{II})$ ke Lewis base $\text{Zn}(\text{II})$ ($\text{L}_3\text{-Zn}^{2+}\text{-OH}^-$) dimungkinkan, seperti ditunjukkan pada serangan nukleofilik Zn yg dikatalisierangan nukleofilik air dgn keberadaan CO_2 . Selain dampak jenis katalis yang dipakai, Onda et al tahun 2008 juga menjelaskan bahwa pada uji coba pembuatan asam laktat dengan menggunakan katalis Pt/C, kenaikan temperatur berdampak positif terhadap yield asam laktat yang diperoleh. Yield tertinggi yang dicapai adalah $\pm 45\%$. Dampak positif juga terlihat dari naiknya konsentrasi NaOH, pada rentang 0-2 M, dengan yield saat 2 M adalah 46%. Katalis lainnya yang mempunyai yield asam laktat yang lebih tinggi dari Bicker et al. (2005) dan Onda et al. (2008) adalah katalis Lanthanide triflates $\text{Er}(\text{OTf})_3$ yang dilakukan oleh Wang et al. (2013). Pemilihan katalis ini dikarenakan kelebihanannya yaitu katalis stabil baik dalam pelarut air maupun pelarut organik lainnya, lebih mudah direcovery, dan lebih ramah lingkungan. Selain fruktosa, Wang et al juga melihat pengaruh bahan baku lain seperti

DHA, glukosa, sukrosa, inulin, selubiosa, dan pati. Dari keseluruhan bahan baku tersebut, DHA merupakan penghasil asam laktat tertinggi yaitu sebesar 98,2%. Hal ini dikarenakan DHA dan gula triosa lainnya merupakan produk intermediet dalam produksi asam laktat. Sehingga, untuk menjadi asam laktat, jalur reaksinya lebih pendek dibandingkan substrat lainnya, yaitu melalui jalur dehidrasi yang diikuti oleh *1,2-hydrate shift*.

Bahan baku selanjutnya yang lebih banyak menarik minat peneliti adalah selulosa. Hal ini karena selulosa merupakan unsur utama sebagai penyusun pada tumbuhan yang ada di alam. Produksi asam laktat dari selulosa diteliti oleh Zhang (2011) menggunakan beberapa katalis logam seperti Zn, Ni, dan C. Dari ketiga katalis tersebut dan kombinasinya, perolehan asam laktat tertinggi yang didapat adalah 42,15% dengan menggunakan katalis kombinasi Zn, Ni dan C. Dalam penelitian ini, untuk memperoleh optimisasi perolehan yield asam laktat, diprediksi menggunakan *Design Expert* yang berdasarkan pada Numerical Optimization. Ada dua area yield tertinggi dari desain ini, pertama pada konsentrasi Ni tertinggi (0,03 gr) dan NaOH tertinggi (2,5 mol/L) dengan yield asam laktat lebih dari 40%, dan kedua pada konsentrasi Zn terendah (0,02 gr) dan karbon aktif tertinggi (0,07 gr) dengan yield asam laktat lebih dari 40%. Untuk memeriksa hasil prediksi dengan model, dilakukan eksperimen

menggunakan Zn 0,02 gr, Ni 0,03 gr, dan karbon aktif 0,07 gr. Dari hasil eksperimen didapatkan bahwa, yield asam laktat yang diperoleh dengan parameter tersebut adalah 42%, mirip dengan hasil prediksi model. Selain Zhang et al. (2011), penelitian yang dilakukan oleh Wang et al 2013 dengan katalis $\text{Er}(\text{OTf})_3$ memperoleh hasil asam laktat yang tinggi yaitu 89,6%. Dari beberapa penelitian ini terlihat bahwa katalis $\text{Er}(\text{OTf})_3$ lebih baik kinerjanya untuk menghasilkan asam laktat.

Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Rasrendra et al. (2011) dan Sitompul et al. (2014) menguji coba kinerja katalis AlCl_3 pada produksi asam laktat dengan bahan baku lignoselulosa Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). Yield yang dihasilkan masih sangat rendah yaitu 8,33%. Hal ini dikarenakan TKKS yang digunakan belum dilakukan perlakuan awal. Sehingga katalis tidak mampu menembus ikatan antara lignin, selulosa, dan hemiselulosa. Untuk membuktikan efek perlakuan awal pada TKKS, Chin et al. (2016) melakukan penelitian dengan memberikan efek *ballmill* pada TKKS. Penelitian ini menggunakan katalis $\text{Pb}(\text{II})$ ion. Yield asam laktat yang diperoleh dengan perlakuan awal adalah 46,5%. Sedangkan yield asam laktat yang diperoleh tanpa perlakuan awal adalah 24,8%. Perlakuan *ballmill* dapat mengurangi ukuran TKS dan menurunkan derajat kristalinitas pada bahan. Sifat amorf pada TKS menyebabkan tahap hidrolisis ke monomer lebih cepat sehingga yield bisa tinggi. Penelitian Chin et al. (2016) juga mempelajari efek kenaikan temperatur (170-230°C) dan kenaikan konsentrasi katalis (0-14 mM) terhadap konversi lignoselulosa menjadi asam laktat. Chin et al. (2016) menyebutkan bahwa yield asam laktat meningkat dengan meningkatnya temperatur (dari 170-230°C), namun pada temperatur tinggi, konsentrasi katalis yang digunakan bukan konsentrasi tertinggi, tetapi hanya 2 mM. Pada penggunaan konsentrasi katalis yang tinggi, yield asam laktat yang terbentuk menurun, hal ini karena terjadi degradasi asam laktat ke produk lainnya, seperti asam asetat. Penelitian selanjutnya mengenai asam laktat adalah merujuk dari penelitian yang dilakukan oleh (Esposito & Antonietti, 2013)

Esposito & Antonietti (2013) menggunakan katalis basa $\text{Ba}(\text{OH})_2$. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Aini et al tahun 2018, asam laktat diproduksi dari bahan baku lignoselulosa TKKS yang telah mendapat perlakuan steam explosion. Yield asam laktat yang diperoleh adalah 21,57% menggunakan 0,25 M $\text{Ba}(\text{OH})_2$ dengan 5% w/v biomassa. Penelitian Aini et al menjelaskan bahwa produk samping seperti asam format, asam asetat, asam levulinate terbentuk sebagai produk samping. Sedangkan Hidroksi Metil Furfural (HMF) dan furfural tidak bisa terdeteksi kuantitasnya dalam penelitian ini. Namun jika dilihat secara visual, diperkirakan penelitian ini juga menghasilkan HMF dan furfural.

Penelitian dengan bahan baku lignoselulosa dari cemara dan pinus dilakukan oleh Kim et al. (2020) menggunakan katalis $\text{La}(\text{OTf})_3$. Sebelum dimasukkan ke dalam reaktor konversi asam laktat, campuran

lignoselulosa tersebut dilakukan perlakuan awal dengan reaktor kontinyu pada temperatur 180°C dan waktu reaksi 56 menit. Perlakuan awal ini disebut juga dengan perlakuan *Liquid Hot Water* (LHW). Karena kondisi operasi yang digunakan tinggi, maka ion H_3O^+ yang dihasilkan selama reaksi menyebabkan pemutusan ikatan asetil yang diikuti dengan hidrolisis hemiselulosa. Kemudian bahan baku dimasukkan ke dalam reaktor sehingga menghasilkan asam laktat dengan yield 78,4%, pada temperatur reaksi 250°C dan waktu reaksi 1 jam. Penelitian Kim et al. (2020) merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh Liu et al. (2018) dengan katalis yang sama namun berbeda bahan baku. Liu dan kawan-kawan menyebutkan bahwa konversi gula menjadi asam laktat melalui reaksi retro-aldol memerlukan temperatur yang tinggi, yaitu 250°C karena pada temperatur 150°C yield asam laktat yang diperoleh hanya sebesar 9,9%. Hal menarik yang menjadi perhatian dalam penelitian Kim et al (2020) adalah waktu reaksi untuk mencapai yield asam laktat yang tinggi sangat singkat, yaitu hanya 1 jam saja dibandingkan dengan proses konversi secara biologis yang memakan waktu beberapa hari. Waktu reaksi yang singkat dapat digunakan untuk pengembangan proses pada skala yang lebih besar.

3. Kesimpulan

Asam laktat dapat diproduksi dengan jalur fermentasi maupun jalur kimia katalitik. Berbagai bahan baku dapat digunakan seperti dihidroksi aseton, gliseraldehid, piruvaldehid, glukosa, xilosa, fruktosa, sukrosa, selulosa, insulin, selobiosa, pati, levoglukosan, dan lignoselulosa. Dari jalur reaksi biologi, berbagai mikroorganisme dapat digunakan untuk mengkonversi baik monomer gula maupun polimer gula menjadi asam laktat. Produksi asam laktat dengan jalur fermentasi memiliki keuntungan yaitu menghasilkan isomer asam laktat yang lebih murni dibandingkan dengan jalur kimia katalitik. Asam laktat yang dihasilkan oleh kimia katalitik cenderung menghasilkan isomer campuran (rasemik) antara D-asam laktat dan L-asam laktat. Sehingga dengan jalur biologi, biaya untuk pemurnian asam laktat bisa berkurang. Namun karena produksi asam laktat memerlukan waktu reaksi yang lama, banyak minat peneliti beralih ke jalur kimiawi. Produksi asam laktat dengan jalur kimia katalitik dapat ditempuh dari berbagai katalis baik katalis asam lewis, basa lewis ataupun katalis heterogen yang memudahkan pemisahan setelah tahapan reaksi. Dengan menggunakan bahan baku lignoselulosa, katalis $\text{La}(\text{OTf})_3$ dapat menghasilkan yield asam laktat yang baik yaitu 78,4% dengan waktu reaksi 1 jam dan temperatur 250°C.

Ucapan Terima kasih

Penulisan artikel *review* ini tak lepas dari hibah penelitian yang diberikan oleh Badan Pengelola Dana perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS) Tahun 2015, dan hibah penelitian

Sinas melalui Kementerian Riset dan Teknologi Tahun 2016.

Daftar Pustaka

- Aini, A. P., Lee, H. W., Sitompul, J. P., & Rasrendra, C. B. (2018). Production of Lactic Acid from Empty Fruit Bunch of Palm Oil Using Catalyst of Barium Hydroxide. *MATEC Web of Conferences*, 156. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815606004>
- Alrumman, S. A. (2016). Enzymatic saccharification and fermentation of cellulosic date palm wastes to glucose and lactic acid. *Brazilian Journal of Microbiology*, 47(1), 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2015.11.015>
- Alsaheb, R. A. A., Aladdin, A., Othman, Z., Malek, R. A., Leng, O. M., Aziz, R., & Enshasy, H. A. El. (2015). Lactic acid applications in pharmaceutical and cosmeceutical industries. *Available Online Www.Jocpr.Com Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7(10), 729–735. www.jocpr.com
- Bicker, M., Endres, S., Ott, L., & Vogel, H. (2005). Catalytical conversion of carbohydrates in subcritical water: A new chemical process for lactic acid production. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 239(1–2), 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2005.06.017>
- Chambon, F., Rataboul, F., Pinel, C., Cabiach, A., Guillon, E., & Essayem, N. (2011). Cellulose hydrothermal conversion promoted by heterogeneous Brønsted and Lewis acids: Remarkable efficiency of solid Lewis acids to produce lactic acid. *Applied Catalysis B: Environmental*, 105(1–2), 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.04.009>
- Chen, H., Chen, B., Su, Z., Wang, K., Wang, B., Wang, Y., Si, Z., Wu, Y., Cai, D., & Qin, P. (2020). Efficient lactic acid production from cassava bagasse by mixed culture of *Bacillus coagulans* and *Lactobacillus rhamnosus* using stepwise pH controlled simultaneous saccharification and co-fermentation. *Industrial Crops and Products*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112175>
- Chin, S. X., Tasirin, S. M., Chan, C. H., Chia, C. H., Chook, S. W., Zakaria, S., & Sajab, M. S. (2016). Catalytic Conversion of Empty Fruit Bunch (EFB) Fibres into Lactic Acid by Lead (II) ions. *BioResources*, 11(1), 2186–2201.
- Datta, R., & Henry, M. (2006). Lactic acid: Recent advances in products, processes and technologies - A review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 81(7), 1119–1129. <https://doi.org/10.1002/jctb.1486>
- de Oliveira Moraes, A., Ramirez, N. I. B., & Pereira, N. (2016). Evaluation of the Fermentation Potential of Pulp Mill Residue to Produce d(–)-Lactic Acid by Separate Hydrolysis and Fermentation Using *Lactobacillus coryniformis* subsp. *torquens*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 180(8), 1574–1585. <https://doi.org/10.1007/s12010-016-2188-3>
- Djukić-Vuković, A., Mladenović, D., Radosavljević, M., Kocić-Tanackov, S., Pejin, J., & Mojović, L. (2016). Wastes from bioethanol and beer productions as substrates for l(+) lactic acid production - A comparative study. *Waste Management*, 48, 478–482. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.031>
- Esposito, D., & Antonietti, M. (2013). Chemical conversion of sugars to lactic acid by alkaline hydrothermal processes. *ChemSusChem*, 6(6), 989–992. <https://doi.org/10.1002/cssc.201300092>
- Gómez-Gómez, J. A., Giraldo-Estrada, C., Habeych, D., & Baena, S. (2015). Evaluation of biological production of lactic acid in a synthetic medium and in Aloe vera (L.) Burm. f. processing by-products. *Universitas Scientiarum*, 20(3), 369–385. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.SC20-3.eobp>
- Grand View Research. (2021). *Lactic Acid Market*.
- Hayashi, Y., & Sasaki, Y. (2005). Tin-catalyzed conversion of trioses to alkyl lactates in alcohol solution. *Chemical Communications*, 21, 2716–2718. <https://doi.org/10.1039/b501964h>
- Hoheneder, R., Fitz, E., Bischof, R. H., Russmayer, H., Ferrero, P., Peacock, S., & Sauer, M. (2021). Efficient conversion of hemicellulose sugars from spent sulfite liquor into optically pure L-lactic acid by *Enterococcus mundtii*. *Bioresource Technology*, 333. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125215>
- Holm, M. S., Saravanamurugan, S., & Taarning, E. (2010). Conversion of Sugars to Lactic Acid Derivatives Using Heterogeneous Zeotype Catalysts. *Science*, 328(5978), 602–605. <https://doi.org/10.1126/science.1183990>
- Kim, K. H., Kim, C. S., Wang, Y., & Yoo, C. G. (2020). Integrated Process for the Production of Lactic Acid from Lignocellulosic Biomass: From Biomass Fractionation and Characterization to Chemocatalytic Conversion with Lanthanum(III) Triflate. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 59(23), 10832–10839. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c01666>
- Krull, S., Brock, S., Prüße, U., & Kuenz, A. (2020). Hydrolyzed agricultural residues—low-cost nutrient sources for l-lactic acid production. *Fermentation*, 6(4). <https://doi.org/10.3390/FERMENTATION6040097>
- Kuo, Y. C., Yuan, S. F., Wang, C. A., Huang, Y. J., Guo, G. L., & Hwang, W. S. (2015). Production of optically pure l-lactic acid from lignocellulosic hydrolysate by using a newly isolated and d-lactate dehydrogenase

- gene-deficient *Lactobacillus paracasei* strain. *Bioresource Technology*, 198, 651–657. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.071>
- Li, L., Stroobants, C., Lin, K., Jacobs, P. A., Sels, B. F., & Pescarmona, P. P. (2011). Selective conversion of trioses to lactates over Lewis acid heterogeneous catalysts. *Green Chemistry*, 13(5), 1175–1181. <https://doi.org/10.1039/c0gc00923g>
- Liu, D., Kim, K. H., Sun, J., Simmons, B. A., & Singh, S. (2018). Cascade Production of Lactic Acid from Universal Types of Sugars Catalyzed by Lanthanum Triflate. *ChemSusChem*, 11(3), 598–604. <https://doi.org/10.1002/cssc.201701902>
- Lunelli, B. H., Andrade, R. R., Atala, D. I. P., MacIel, M. R. W., Filho, F. M., & Filho, R. M. I. (2010). Production of lactic acid from sucrose: Strain selection, fermentation, and kinetic modeling. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 161(1–8), 227–237. <https://doi.org/10.1007/s12010-009-8828-0>
- Nandini, A., Nagarajan, D., & Chang, J.-S. (2020). Production of Lactic Acid from Microalgal Biomass *Chlorella vulgaris* ESP-31 as a feedstock using PVA Immobilized Bacteria *L. Plantarum* 23. *1st International Conference Eco-Innovation in Science, Engineering, and Technology. NST Proceedings*, 165–169. <https://doi.org/10.11594/nstp.2020.0525>
- Novy, V., Brunner, B., & Nidetzky, B. (2018). L-Lactic acid production from glucose and xylose with engineered strains of *Saccharomyces cerevisiae*: Aeration and carbon source influence yields and productivities. *Microbial Cell Factories*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0905-z>
- Onda, A. (2014). *Production of Lactic Acid from Sugars by Homogeneous and Heterogeneous Catalysts* (pp. 83–107). https://doi.org/10.1007/978-3-642-54458-3_4
- Onda, A., Ochi, T., Kajiyoshi, K., & Yanagisawa, K. (2008). A new chemical process for catalytic conversion of d-glucose into lactic acid and gluconic acid. *Applied Catalysis A: General*, 343(1–2), 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2008.03.017>
- Ponchai, P., Adpakpang, K., Thongratkaew, S., Chaipojjana, K., Wannapaiboon, S., Siwaipram, S., Faungnawakij, K., & Bureekaew, S. (2020). Engineering zirconium-based UiO-66 for effective chemical conversion of d-xylose to lactic acid in aqueous condition. *Chemical Communications*, 56(58), 8019–8022. <https://doi.org/10.1039/d0cc03424j>
- Rasrendra, C. B., Fachri, B. A., Makertihartha, I. G. B. N., Adisasmito, S., & Heeres, H. J. (2011). Catalytic conversion of dihydroxyacetone to lactic acid using metal salts in water. *ChemSusChem*, 4(6), 768–777. <https://doi.org/10.1002/cssc.201000457>
- Rasrendra, C. B., Makertihartha, I. G. B. N., Adisasmito, S., & Heeres, H. J. (2010). Green chemicals from D-glucose: Systematic studies on catalytic effects of inorganic salts on the chemo-selectivity and yield in aqueous solutions. *Topics in Catalysis*, 53(15–18), 1241–1247. <https://doi.org/10.1007/s11244-010-9570-0>
- Samsudin, H., & Iniguez-Franco, F. (2022). *Poly(lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, Applications, and End of Life, @nd Edition* (R. A. Auras, L.-T. Lim, S. E. M. Selke, & H. Tsuji, Eds.; 2nd ed.). Wiley.
- Sitompul, J. P., Simangunsong, R. F., Asrizal, A. A., Alisyahbana, H., Lee, H. W., & Rasrendra, C. B. (2014). Catalytic Conversion of Empty Fruit Bunch of Palm Oil for Producing Lactic Acid. *Procedia Chemistry*, 9, 88–93. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.05.011>
- Taarning, E., Saravanamurugan, S., Holm, M. S., Xiong, J., West, R. M., & Christensen, C. H. (2009). Zeolite-catalyzed isomerization of triose sugars. *ChemSusChem*, 2(7), 625–627. <https://doi.org/10.1002/cssc.200900099>
- Tang, Z., Deng, W., Wang, Y., Zhu, E., Wan, X., Zhang, Q., & Wang, Y. (2014). Transformation of cellulose and its derived carbohydrates into formic and lactic acids catalyzed by vanadyl cations. *ChemSusChem*, 7(6), 1557–1567. <https://doi.org/10.1002/cssc.201400150>
- Tsapekos, P., Alvarado-Morales, M., Baladi, S., Bosma, E. F., & Angelidaki, I. (2020). Fermentative Production of Lactic Acid as a Sustainable Approach to Valorize Household Bio-Waste. *Frontiers in Sustainability*, 1. <https://doi.org/10.3389/frsus.2020.00004>
- Utrilla, J., Vargas-Tah, A., Trujillo-Martínez, B., Gosset, G., & Martínez, A. (2016). Production of D-lactate from sugarcane bagasse and corn stover hydrolysates using metabolic engineered *Escherichia coli* strains. *Bioresource Technology*, 220, 208–214. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.067>
- Wang, F. F., Liu, J., Li, H., Liu, C. L., Yang, R. Z., & Dong, W. S. (2015). Conversion of cellulose to lactic acid catalyzed by erbium-exchanged montmorillonite K10. *Green Chemistry*, 17(4), 2455–2463. <https://doi.org/10.1039/c4gc02131b>
- Wang, Y., Deng, W., Wang, B., Zhang, Q., Wan, X., Tang, Z., Wang, Y., Zhu, C., Cao, Z., Wang, G., & Wan, H. (2013). Chemical synthesis of lactic acid from cellulose catalysed by lead(II) ions in water. *Nature Communications*, 4. <https://doi.org/10.1038/ncomms3141>
- Wischrall, D., Arias, J. M., Modesto, L. F., de França Passos, D., & Pereira, N. (2019). Lactic acid production from sugarcane bagasse hydrolysates by *Lactobacillus pentosus*: Integrating xylose and

- glucose fermentation. *Biotechnology Progress*, 35(1). <https://doi.org/10.1002/btpr.2718>
- Yan, X., Jin, F., Tohji, K., Kishita, A., & Enomoto, H. (2010). Hydrothermal conversion of carbohydrate biomass to lactic acid. *AIChE Journal*, 56(10), 2727–2733. <https://doi.org/10.1002/aic.12193>
- Yang, L., Su, J., Carl, S., Lynam, J. G., Yang, X., & Lin, H. (2015). Catalytic conversion of hemicellulosic biomass to lactic acid in pH neutral aqueous phase media. *Applied Catalysis B: Environmental*, 162, 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.06.025>
- Yankov, D. (2022). Fermentative Lactic Acid Production From Lignocellulosic Feedstocks: From Source to Purified Product. In *Frontiers in Chemistry* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.823005>
- Zhang, S., Jin, F., Hu, J., & Huo, Z. (2011). Improvement of lactic acid production from cellulose with the addition of Zn/Ni/C under alkaline hydrothermal conditions. *Bioresource Technology*, 102(2), 1998–2003. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.049>