



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



Pengembangan Industri Berbasis Lignoselulosa

Profesor Ronny Purwadi

**Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB
12 Oktober 2024**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

PENGEMBANGAN INDUSTRI BERBASIS LIGNOSELULOSA

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

PENGEMBANGAN INDUSTRI BERBASIS LIGNOSELULOSA

Prof. Ronny Purwadi

12 Oktober 2024
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:
Pengembangan Industri Berbasis Lignoselulosa

Penulis : Prof. Ronny Purwadi

Reviewer : Prof. I.G.B. Ngurah Makertihartha

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-583-5

e-ISBN : 978-623-297-584-2 (PDF)

ITB PRESS

© Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

"He has made everything beautiful in its time.
He has also set eternity in the human heart;
yet no one can fathom what God has done
from beginning to end."

Ecclesiastes 3:11

PRAKATA

Buku ini hadir sebagai respons terhadap semakin mendesaknya kebutuhan akan inovasi di bidang energi terbarukan dan bahan baku alternatif yang ramah lingkungan. Lignoselulosa, yang merupakan bahan dasar utama dalam biomassa tanaman, memiliki potensi luar biasa untuk diolah menjadi produk bernilai tinggi. Indonesia, dengan kekayaan sumber daya alamnya, khususnya limbah pertanian dan perkebunan, memiliki kesempatan besar untuk memanfaatkan lignoselulosa sebagai bahan baku industri yang berkelanjutan. Oleh karena itu, pengembangan teknologi pengolahan lignoselulosa tidak hanya penting untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, tetapi juga sebagai langkah strategis dalam membangun ekonomi hijau dan menghadapi tantangan perubahan iklim.

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang yang memberi saya kemampuan untuk menyelesaikan naskah orasi ilmiah dengan judul "**Pengembangan Industri Berbasis Lignoselulosa**". Penghargaan dan terima kasih yang setinggi-tingginya saya sampaikan kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung yang memberi kesempatan kepada saya untuk menyampaikan orasi ilmiah pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar ITB. Orasi ilmiah ini merupakan salah satu tanggung jawab akademik atas jabatan Guru Besar dalam bidang ilmu Teknologi Proses Konversi Biomassa di Institut Teknologi Bandung. Semoga naskah orasi ilmiah ini dapat memberikan gambaran komprehensif dan inspiratif bagi seluruh insan generasi emas Indonesia.

Bandung, 12 September 2024

Profesor Ronny Purwadi

SINOPSIS

Perubahan iklim yang semakin parah akibat emisi gas rumah kaca dari penggunaan bahan bakar fosil menuntut adanya solusi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Pengembangan industri berbasis lignoselulosa menjadi penting karena bahan baku ini dapat diolah menjadi bioenergi dan produk-produk terbarukan lainnya yang memiliki jejak karbon lebih rendah. Dengan memanfaatkan limbah pertanian dan hutan, industri ini tidak hanya membantu mengurangi emisi karbon, tetapi juga mendukung praktik ekonomi sirkular yang lebih efisien dan berkelanjutan. Inisiatif ini menjadi langkah strategis dalam mitigasi perubahan iklim dan transisi menuju ekonomi hijau.

Lignoselulosa adalah bahan struktural yang terdapat pada dinding sel tumbuhan, terdiri dari tiga komponen utama, yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Sebagai sumber daya terbarukan yang melimpah, lignoselulosa memiliki potensi besar untuk diolah menjadi berbagai produk bernilai tambah, termasuk bioenergi, bahan kimia, dan material ramah lingkungan.

Pemrosesan lignoselulosa adalah rangkaian proses yang bertujuan untuk mengubah bahan mentah lignoselulosa menjadi produk antara seperti glukosa, xilosa, atau monomer lignin. Selanjutnya, produk antara ini dapat diproses menjadi produk akhir yang bernilai tambah seperti, bioetanol, biobutanol, asam sitrat, dan bahan kimia terbarukan lainnya. Proses ini melibatkan pemecahan tiga komponen utama lignoselulosa—selulosa, hemiselulosa, dan lignin—melalui berbagai metode seperti *pretreatment*, dan hidrolisis enzimatis. *Pretreatment* bertujuan untuk membuka struktur kompleks lignoselulosa agar lebih mudah diakses oleh enzim sedangkan hidrolisis enzimatis bertujuan untuk mendegradasi komponen lignoselulosa menjadi monomer penyusunnya.

Penelitian tentang pemrosesan lignoselulosa di ITB sudah dimulai dari tahun 2012. Langkah pertama yang dilakukan adalah penyusunan rancangan konseptual dari proses pengolahan lignoselulosa. Selanjutnya, penelitian yang lebih detail dilaksanakan untuk memilih dan menentukan kondisi operasi yang sesuai. Hasil penelitian tersebut kemudian diimplementasikan dalam sebuah pabrik pilot dengan kapasitas 125 kg lignoselulosa per *batch*.

Pengembangan produk turunan juga dilaksanakan di ITB. Beberapa produk seperti bioetanol, biobutanol, ragi, dan asam sitrat telah dan masih terus dikembangkan.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	VII
SINOPSIS	IX
DAFTAR ISI.....	XI
DAFTAR GAMBAR	XIII
DAFTAR TABEL.....	XVII
1. PENDAHULUAN	1
2. BAHAN LIGNOSELULOSA.....	5
2.1 Struktur Lignoselulosa.....	5
2.2 Sumber Lignoselulosa	8
2.3 Komposisi Lignoselulosa	9
2.4 Potensi Lignoselulosa	9
3. TEKNOLOGI PENGOLAHAN LIGNOSELULOSA	11
3.1 Ekosistem Industri Berbahan-baku Lignoselulosa	11
3.2 <i>Pretreatment</i>	13
3.3 Hidrolisis	17
4. PENGEMBANGAN PROSES PENGOLAHAN LIGNOSELULOSA.....	21
4.1 Studi Rancangan Konseptual	22
4.2 Proses <i>Pretreatment</i>	24
4.2 Proses Hidrolisis Enzimatik.....	32
4.3 Sistem Pengadukan	37
4.4 Pengembangan Produksi Enzim Selulase.....	41
4.5 Pabrik Pilot Biorefinery	45
5. PENGEMBANGAN PRODUK	49
5.1 Bioetanol.....	49
5.2 Biobutanol	50
5.3 Ragi Kering	51
5.4 Asam Sitrat.....	52
6. PENUTUP.....	55
3. UCAPAN TERIMA KASIH	57
DAFTAR PUSTAKA.....	61
CURRICULUM VITAE.....	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Struktur Lignoselulosa yang berasal dari dinding sel tumbuhan. Lignoselulosa terdiri dari selulosa, hemiselulosa dan lignin (Brethauer et al., 2020).	5
Gambar 2	Struktur kimia selulosa yaitu polimer dari glukosa dengan ikatan β -1,4-glikosidik. Selulosa memiliki unit perulangan selobiosa.....	6
Gambar 3	Polimer xilan yang merupakan salah satu contoh hemiselulosa. Hemiselulosa merupakan polimer bercabang.	7
Gambar 4	Monomer dari lignin: p-coumryl alcohol, coniferyl alcohol, dan sinapyl alcohol.	8
Gambar 5	Ekosistem industri berbasis bahan baku lignoselulosa. Proses <i>pretreatment</i> dan hidrolisis adalah proses awal dan utama dalam mewujudkan ekosistem ini.....	11
Gambar 6	Skema dasar proses produksi bioetanol dari tandan kosong sawit (TKS).	22
Gambar 7	Evaluasi perbandingan proses produksi etanol dari TKS.	23
Gambar 8	Massa komponen lignoselulosa TKS: RM (awal); A - proses ALFEX; L - proses LTA; angka menyatakan konsentrasi NaOH (%-berat).	25
Gambar 9	Foto morfologi permukaan TKS menggunakan SEM pada perbesaran 500 kali: (a) TKS sebelum <i>pretreatment</i> ; (b) TKS setelah <i>pretreatment</i> LTA; dan (c) TKS setelah <i>pretreatment</i> ALFEX.	26
Gambar 10	Kapasitas swelling serat TKS sebelum (RM) dan setelah <i>pretreatment</i> ALFEX (A) dan LTA (L) pada konsentrasi NaOH 0, 4, 8, 12, dan 15%.....	27
Gambar 11	Reaktor ALFEX (alkali fiber explosion) berukuran 500 mL dari stainless steel 304 yang dapat beroperasi hingga 10 bar.....	28
Gambar 12	Serat TKS sebelum (kiri) dan setelah (kanan) diolah menggunakan larutan NaOH 1 M di dalam reaktor	

	ALFEX (<i>alkali fiber explosion</i>) pada kondisi tekanan 5 bar selama 30 menit.....	29
Gambar 13	Rancangan reaktor <i>pretreatment</i> skala 1000 mL berpengaduk beserta tangki penampung (<i>expander tank</i>) (kiri); foto rangkaian peralatan yang sudah beroperasi (kanan), dan reaktor <i>pretreatment</i> (inset).	30
Gambar 14	Konsentrasi glukosa hasil hidrolisis berdasarkan pengumpanan bertahap dengan jumlah umpan, enzim dan larutan buffer seragam (a) dan menurun (b) pada selang 4 jam (K4) dan 6 jam (K6).	33
Gambar 15	Konsentrasi glukosa hasil hidrolisis berdasarkan pengumpanan bertahap dengan jumlah umpan seragam (c) dan menurun (d) dan penambahan enzim dan larutan buffer di awal (50%) dan akhir (50%) pada selang 4 jam (K4) dan 6 jam (K6).	33
Gambar 16	Kondisi campuran serat TKS dan enzim sebelum (kiri) dan sesudah (kanan) reaksi hidrolisis berlangsung.....	34
Gambar 17	Perbandingan strategi pengumpanan pada: (a) konsentrasi glukosa; (b) <i>enzyme digestibility</i> (ED).....	36
Gambar 18	Reaktor <i>pretreatment</i> dengan pengaduk yang dapat dibongkar-pasang: (a) <i>spiral-anchor</i> ; (b) <i>double helix</i> ; dan (c) <i>3-stage single blade</i>	39
Gambar 19	Kinerja pengaduk reaktor <i>pretreatment</i> : (a) <i>spiral-anchor</i> ; (b) <i>helical-ribbon</i> ; dan (c) <i>3-stage single blade</i>	40
Gambar 20	Jenis pengaduk yang diuji untuk reaktor hidrolisis: (a) <i>anchor-screw</i> ; (b) <i>helical-ribbon</i> parsial; (c) <i>Modified 3-stage blade</i> ; dan (d) <i>single helical ribbon</i>	41
Gambar 21	Aktivitas enzim selulase yang dihasilkan oleh <i>T. reesei</i> dan <i>A. niger</i> : masing-masing individu, enzim campuran dan kultur campuran.	43
Gambar 22	Fermentasi fasa padat (a); dan fermentasi semi-padat (b).....	45
Gambar 23	Peresmian Pabrik Pilot Pengolahan Tandan Kosong Kelapa Sawit oleh Menteri Perindustrian RI dan penanda-tanganan Perjanjian Kerjasama antara ITB, PT Rekayasa Industri dan Balai Besar Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri Agro (BBSPJIA). Dari kiri ke	

kanan: Bapak Agus Gumiwang Kartasasmita (Menteri Perindustrian RI), Bapak Ir. Edi Sutopo, M.Si (Kepala BBSPJIA), Ibu Ir. Triyani Utaminingsih (Dirut PT Rekayasa Industri), Prof. Brian Yulianto (Dekan FTI-ITB) dan Bapak Andi Rizaldi, S.T.,M.M. (Kepala Badan Standardisasi dan Kebijakan Jasa Industri) 46

Gambar 24

Pabrik Pilot Pengolahan TKS: (a) reaktor *pretreatment*; (b) bagian atas dari reaktor *pretreatment*; (c) siklon untuk menangkap semburan TKS olahan dari reaktor *pretreatment*; (d) reaktor hidrolisis enzimatik. 47

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Sumber Lignoselulosa di Indonesia tahun 2023	8
Tabel 2	Komposisi Lignoselulosa (dalam %-berat basis kering)	9
Tabel 3	Kristalinitas TKS sebelum (RM) dan setelah <i>pretreatment</i> ALFEX dan LTA pada konsentrasi NaOH 0, 4, 8, 12 dan 15%- berat.	25
Tabel 4	Daftar paten terkait <i>pretreatment</i> dan hidrolisis tandan kosong sawit.	37

1. PENDAHULUAN

Pada tahun 1895, ilmuwan kimia dari Swedia - Svante Arrhenius - mengajukan hipotesisnya yang berjudul *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground* di hadapan The Stockholm Physical Society yang membahas tentang dampak peningkatan kadar karbon dioksida (CO₂) di atmosfer akibat pembakaran bahan bakar fosil yang dapat mengakibatkan pemanasan global (Arrhenius, 1896; Chris Somerville, 2006). Pemikirannya tentang "efek rumah kaca" ini menjadi alasan tentang pentingnya pengurangan emisi gas rumah kaca (CO₂, H₂O dan CH₄) untuk menjaga keseimbangan iklim bumi. Setengah abad kemudian, Charles David Keeling mulai mengukur peningkatan konsentrasi CO₂. Kesadaran publik tentang perubahan iklim dimulai pada Konferensi Rio de Janeiro yang dikenal sebagai Earth Summit 1992 - di mana negara-negara di dunia diajak untuk bekerja sama dalam menangani perubahan iklim dan mulai merancang langkah-langkah mitigasi serta adaptasi. Pada tahun 1997, Protokol Kyoto adalah perjanjian internasional yang memiliki komitmen mengikat secara hukum bagi negara-negara maju untuk mengurangi emisi gas rumah kaca mereka sebesar rata-rata 5.2% dari tingkat emisi tahun 1990. Pada tahun 2015, Perjanjian Paris diperkenalkan untuk memperbaiki kekurangan pada Protokol Kyoto. Dalam perjanjian ini, semua negara baik yang maju maupun berkembang diminta berkontribusi dalam mengurangi emisi gas rumah kaca. Salah satu tujuan utama Perjanjian Paris adalah untuk menjaga kenaikan suhu global di bawah 2 °C dibandingkan dengan tingkat pra-industri.

Upaya pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) merupakan tantangan global yang tak terhidarkan. Berbagai upaya dilakukan oleh pemerintah, industri dan individu untuk mengurangi emisi ini melalui kebijakan, teknologi dan perubahan perilaku. Beberapa upaya yang bisa dilakukan untuk mengurangi emisi GRK antara lain: (1) peningkatan penggunaan energi terbarukan; (2) penggunaan energi secara efisien; (3) pengurangan penggunaan bahan bakar fosil; (4) reboisasi dan penghentian deforestasi; (5) pengurangan emisi dari limbah; (6) kebijakan dan regulasi; dan (7) perubahan perilaku individu.

Pengurangan penggunaan bahan bakar fosil harus diikuti dengan peningkatan penggunaan energi terbarukan karena energi sangat diperlukan dalam kehidupan manusia. Kisah sukses Brazil dalam mengubah konsumsi

bahan bakar fosil dan menggantikannya dengan bioetanol adalah salah satu contoh yang baik. Pada tahun 1975, Pemerintah Brazil mencanangkan program "Proalcool" yang merupakan respons terhadap krisis minyak bumi di tahun 1970-an. Pemerintah Brazil saat itu memberikan subsidi dan mengeluarkan mandat untuk mencampur bioetanol ke dalam bensin (1975-1979). Saat itu, etanol masih diproduksi dari molase. Melalui kebijakan tersebut, industri mobil yang dapat menggunakan 100% bahan bakar etanol meningkat pesat, dan pada tahun 1986, jumlah kendaraan berbasis etanol mencapai 92% dari populasi kendaraan di Brazil. Hal ini memberi dampak ekonomi yang positif. Produksi bioetanol meningkat mencapai 12,7 miliar liter di tahun 1992. Teknologi produksi bioetanol terus dikembangkan, mulai dari pertanian (tebu), sistem produksi gula-etanol yang terintegrasi hingga kebijakan-kebijakan yang menguntungkan petani, produsen dan konsumen. Saat ini, harga bahan bakar etanol 100% (hydrous-ethanol) sekitar 60% dari harga bahan bakar bensin fosil atau bahan bakar campuran (E25).

Mirip dengan Brazil, Indonesia juga melakukan konversi bahan bakar fosil - solar - dengan bahan bakar terbarukan yang terbuat dari minyak sawit - biodiesel. Melalui Peraturan Pemerintah Nomor 32 tahun 2006, Pemerintah Indonesia mendukung penggunaan biodiesel. Ini merupakan titik awal pengembangan biodiesel berbasis minyak sawit di Indonesia. Pemerintah memberikan mandat untuk menggunakan B20 (campuran 20% biodiesel dalam minyak solar), dan terus berkembang hingga B35 di tahun 2023. Produksi biodiesel meningkat pesat dari 190 ribu kL pada tahun 2009 menjadi 12,7 juta kL pada tahun 2023. Peran regulasi pemberian insentif kepada produsen biodiesel untuk menutup selisih harga biodiesel dan minyak solar merupakan salah satu terobosan yang cerdas dalam mencapai keberhasilan program ini.

Salah satu tantangan yang dihadapi dari bioetanol dari tebu dan biodiesel dari minyak sawit adalah konflik antara produksi energi dan produksi pangan. Produk pertanian yang digunakan untuk memproduksi bahan bakar nabati ini juga merupakan komoditas pangan yang penting. Peningkatan permintaan bahan bakar nabati dapat menyebabkan peningkatan harga bahan pangan yang dampaknya dapat membahayakan kestabilan ekonomi nasional. Produksi bahan bakar nabati dari tanaman-tanaman non-pangan terus diteliti dan dikembangkan agar produksi bahan bakar nabati tidak lagi bersinggungan dengan bahan pangan.

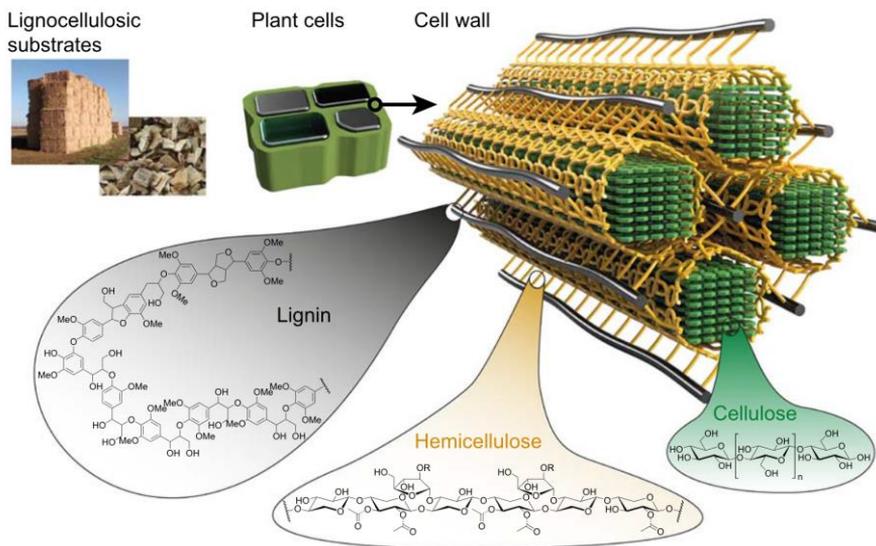
Lignoselulosa merupakan bahan yang potensial untuk dikembangkan sebagai bahan baku, bukan hanya untuk bahan bakar nabati tetapi juga untuk produk-produk turunannya yang bernilai tinggi. Biomassa lignoselulosa sangat melimpah dan tersebar luas di seluruh dunia dalam bentuk limbah pertanian, kehutanan maupun industri. Sebagai contoh, industri sawit di Indonesia pada tahun 2023 menghasilkan 48,6 juta ton minyak sawit mentah (CPO), menyisakan tandan kosong sawit sebanyak 120 juta ton. Berbagai jenis sumber lignoselulosa tersedia di Indonesia seperti bagas tebu, merang padi, tongkol jagung, limbah industri kayu, dan lain sebagainya.

Tantangan teknologi masih menjadi kendala utama dalam pemanfaatan lignoselulosa. Para peneliti di dunia ini masih terus mengembangkan teknologi yang efisien dalam memanfaatkan bahan lignoselulosa ini. Pengolahan lignoselulosa menjadi produk antara maupun produk akhir turunannya masih belum efisien sehingga belum dapat dikomersilkan. Sebagai contoh, produksi bioetanol dari lignoselulosa memerlukan ongkos yang lebih besar termasuk untuk energi, enzim, dan bahan penunjang lainnya dibandingkan dengan produksi bioetanol dari gula atau pati. Karena itu, terobosan-terobosan teknologi sangat diperlukan agar proses ini dapat lebih efisien dan lebih murah.

Tulisan ini menyuguhkan paparan tentang upaya membangun industri berbasis lignoselulosa. Semoga solusi alternatif yang menjawab sejumlah tantangan dalam pengembangan teknologi konversi lignoselulosa bisa memberikan wawasan dan inspirasi.

2. BAHAN LIGNOSELULOSA

Dinding sel tanaman adalah struktur penting yang memberi bentuk, kekutan dan perlindungan. Komponen utama dinding sel ini adalah lignoselulosa, yang merupakan serat selulosa yang diikat oleh hemiselulosa dan dibalut oleh lignin (Brethauer et al., 2020). Lignoselulosa ini yang memungkinkan tanaman untuk tumbuh tinggi, menahan terpaan angin dan bertahan hidup dalam berbagai kondisi lingkungan yang keras. Selain memberi kekuatan dan perlindungan, lignoselulosa juga berperan penting dalam transportasi air dan nutrisi di dalam tanaman. Dinding sel yang terbuat dari lignoselulosa memungkinkan tanaman untuk mengatur air dan nutrisi dari akar ke daun (Abramson et al., 2010; Pérez et al., 2002).



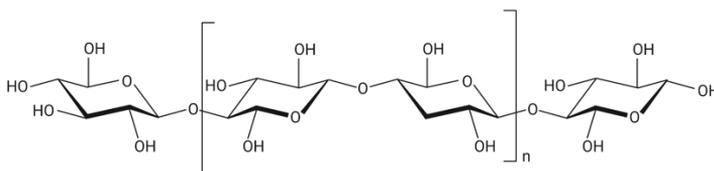
Gambar 1 Struktur Lignoselulosa yang berasal dari dinding sel tumbuhan. Lignoselulosa terdiri dari selulosa, hemiselulosa dan lignin (Brethauer et al., 2020).

2.1 Struktur Lignoselulosa

Lignoselulosa merupakan sebuah material kompleks yang terdiri dari tiga polimer utama, yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin (Gambar 1). Berikut ini adalah penjelasan lebih rinci tentang masing-masing komponen utama pembentuk lignoselulosa.

2.1.1 Selulosa

Selulosa merupakan komponen utama lignoselulosa yang memberi kekuatan pada dinding sel. Polisakarida ini merupakan polimer homogen dari molekul glukosa yang terhubung satu sama lain melalui ikatan β -1,4-glikosidik (Gambar 2). Jumlah unit glukosa dalam polimer selulosa sangat bervariasi, tetapi umumnya berkisar antara 2000 hingga 3000 unit. Selulosa memiliki unit perulangan berupa selobiosa, yaitu disakarida dari glukosa yang memiliki ikatan β -1,4-glikosidik. Struktur rantai lurus dan panjang ini memberikan kekuatan tarik yang luar biasa sehingga memungkinkan tanaman tumbuh tinggi dan kokoh (Demirbas, 2009; Pérez et al., 2002).



Gambar 2 Struktur kimia selulosa yaitu polimer dari glukosa dengan ikatan β -1,4-glikosidik. Selulosa memiliki unit perulangan selobiosa.

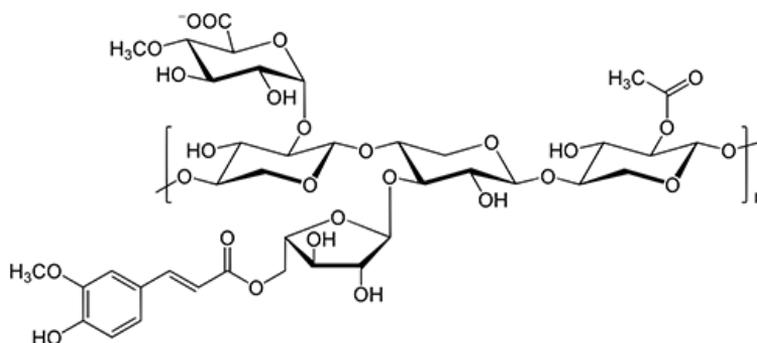
Rantai-rantai lurus selulosa dijalin membentuk mikrofibril, yaitu serat-serat kecil yang tersusun secara paralel dan terikat satu sama lain oleh ikatan hidrogen. Mikrofibril ini kemudian membentuk lapisan-lapisan yang saling silang-menyilang, memberikan kekuatan dan kekakuan pada dinding sel agar dapat mempertahankan bentuk sel tumbuhan.

Ikatan β -1,4-glikosidik pada selulosa tidak mudah terurai oleh air, asam dan basa encer pada kondisi ambien. Hanya beberapa jenis mikroorganisme pengurai yang dapat menghasilkan enzim-enzim tertentu untuk mengurai selulosa menjadi struktur yang lebih sederhana. Selain itu, peran proteksi dari hemiselulosa dan lignin dapat membuat lignoselulosa semakin sulit didegradasi secara alami.

2.1.2 Hemiselulosa

Hemiselulosa adalah polisakarida heterogen yang berperan penting dalam struktur dan fungsi dinding sel tumbuhan. Polisakarida ini berfungsi sebagai perekat yang menggabungkan beberapa mikrofibril menjadi sebuah serat

yang kuat. Hemiselulosa tersusun dari beberapa jenis monomer gula C6 (hexan) seperti: glukosa, manosa dan galaktosa; serta monomer gula C5 (pentan) seperti: xilosa dan arabinosa, yang terhubung dalam rantai lurus dan bercabang. Struktur hetero-polimer bercabang ini memungkinkan hemiselulosa memiliki interaksi yang kuat dengan selulosa maupun lignin (Baruah et al., 2018).

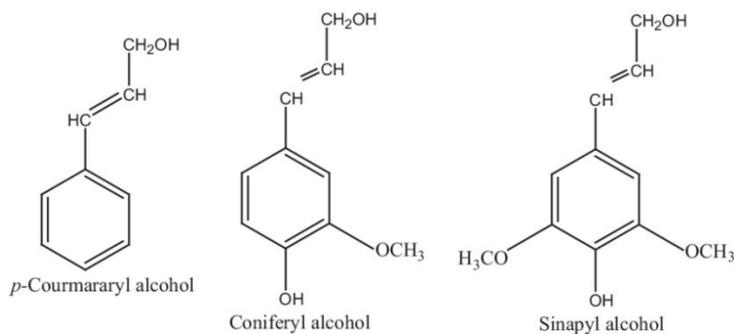


Gambar 3 Polimer xilan yang merupakan salah satu contoh hemiselulosa. Hemiselulosa merupakan polimer bercabang.

2.1.3 Lignin

Lignin adalah polimer kompleks yang sangat berperan dalam memberi kekuatan, kekakuan dan perlindungan pada dinding sel tumbuhan. Lignin mengisi ruang antara selulosa dan hemiselulosa dan bersifat hidrofobik sehingga bermanfaat dalam mencegah air ke luar dari dalam sel. Lignin merupakan polimer aromatik dengan tiga monomer *monolignol* utama yaitu: *p-coumaryl alcohol*; *coniferyl alcohol*; dan *sinapyl alcohol* (Gambar 4). Ketiga *monolignol* ini dibedakan berdasarkan jumlah gugus metoksi (-OCH₃) yang terikat pada cincin aromatiknya. Monomer *p-coumaryl alcohol* tidak memiliki gugus metoksi, *coniferyl alcohol* memiliki satu gugus metoksi, sedangkan *sinapyl alcohol* memiliki dua gugus metoksi (Glasser, 2021; Sannigrahi et al., 2010).

Perbedaan komposisi *monolignol* ini menghasilkan berbagai jenis lignin dengan sifat yang berbeda-beda. Misalnya, lignin dari tumbuhan konifer (tumbuhan berdaun jarum) memiliki unit *guaiacyl* yang berasal dari *coniferyl alcohol*, sedangkan lignin dari tumbuhan angiosperma (tumbuhan berbunga) mengandung campuran unit *guaiacyl* dan *syringyl* yang berasal dari *coniferyl alcohol* dan *sinapyl alcohol*.



Gambar 4 Monomer dari lignin: *p*-coumaryl alcohol, coniferyl alcohol, dan sinapyl alcohol.

2.2 Sumber Lignoselulosa

Seperti yang telah dijelaskan bahwa sumber lignoselulosa adalah dinding sel tumbuhan. Dengan demikian, sumber lignoselulosa yang dapat digunakan sebagai bahan baku adalah bagian-bagian tumbuhan yang sudah tidak berguna seperti limbah pertanian, perkebunan, dan industri.

Tabel 1 Sumber Lignoselulosa di Indonesia tahun 2023

Lignoselulosa	Jumlah (ton)
<i>Tandan kosong sawit</i>	45 juta
<i>Pelepah sawit</i>	12.3 juta
<i>Batang sawit</i>	6.20 juta
<i>Bagasse tebu</i>	1.18 juta
<i>Tongkol jagung</i>	7.23 juta
<i>Jerami padi</i>	80.44 juta

Tabel 2.1 menunjukkan jumlah sumber lignoselulosa di Indonesia pada tahun 2023. Jerami padi adalah sumber lignoselulosa dengan jumlah terbesar, tetapi bahan ini tersebar di sawah-sawah sehingga upaya pengumpulannya relatif sulit dan mahal. Sumber lain seperti tandan kosong sawit dan bagasse tebu sudah terkumpul di pabrik kelapa sawit dan pabrik gula sehingga akses terhadap bahan-bahan tersebut lebih mudah. Selain itu, pabrik yang memanfaatkan sumber lignoselulosa ini dapat terintegrasi dengan pabrik penghasil sumber lignoselulosa sehingga berbagai kebutuhan pabrik seperti utilitas dan lain-lain dapat digunakan secara lebih efisien.

Selain limbah pertanian, perkebunan dan industri, lignoselulosa dapat diperoleh dari tanaman khusus penghasil lignoselulosa seperti *switchgrass*, *alfalfa*, *flax* atau rami, *hemp*, *poplar*, atau hawar (González-García et al., 2010).

2.3 Komposisi Lignoselulosa

Secara umum, komponen utama lignoselulosa adalah selulosa, hemiselulosa dan lignin; tetapi komposisi masing-masing komponen tersebut sangat bervariasi dan sangat bergantung kepada spesies tanaman dan faktor-faktor pertumbuhannya seperti jenis tanah, cuaca dan lain sebagainya. Tabel 2.2 menyajikan komposisi lignoselulosa yang tersedia di Indonesia.

Tabel 2 Komposisi Lignoselulosa (dalam %-berat basis kering)

Bahan Lignoselulosa	Selulosa	Hemiselulosa	Lignin	Referensi
<i>Tandan kosong sawit</i>	38-43	22-35	11-23	(Mardawati et al., 2018)
<i>Pelepah sawit</i>	44-56	16-30	15-20	(Ang et al., 2013)
<i>Batang sawit</i>	41-45	17-29	24-25	(Ang et al., 2013)
<i>Bagas tebu</i>	40-45	30-35	20-30	(Baruah et al., 2018)
<i>Bagas sorgum</i>	45	27	21	(Baruah et al., 2018)
<i>Tongkol jagung</i>	41	31	12	(Baruah et al., 2018)
<i>Kayu pinus</i>	42	21	30	(Baruah et al., 2018)
<i>Jerami padi</i>	38	32	12	(Baruah et al., 2018)
<i>Switchgrass</i>	31	24	18	(Baruah et al., 2018)

Komponen selulosa adalah bagian terbesar di dalam lignoselulosa, umumnya mencapai 30-50% dari berat kering lignoselulosa. Bahan-bahan tertentu memiliki komponen hemiselulosa yang lebih besar dari lignin, tetapi sebaliknya ada juga bahan yang mengandung lignin lebih banyak dari hemiselulosa seperti kayu pinus dan batang sawit.

2.4 Potensi Lignoselulosa

Lignoselulosa dapat difraksionasi menjadi komponen-komponennya. Proses fraksionasi ini dibahas terpisah pada Bab 3. Berbagai bahan bernilai tinggi dapat dihasilkan dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin.

Selulosa dapat dihidrolisis menjadi monomernya, yaitu glukosa. Glukosa dapat dikonversi melalui proses fermentasi yang melibatkan berbagai mikroorganisme menjadi bahan-bahan lain seperti: etanol, butanol, asam sitrat, asam glutamat, asam laktat, asam glukonat, asam susinat, enzim, protein sel tunggal dan lain sebagainya (Dale, 2003; Demirbas, 2009). Etanol dapat dikonversi lebih lanjut menjadi etilen dan butadien. Kedua bahan ini dapat digunakan sebagai bahan baku plastik dan elastomer. Selain itu, etanol dapat direaksikan dengan asam organik atau asam lemak menjadi ester. Ester ini banyak digunakan sebagai perisa dan pembawa aroma dalam makanan.

Glukosa juga dapat dihidrogenasi menjadi gula alkohol (sorbitol), yaitu gula yang tidak dapat diserap oleh tubuh dan berguna sebagai pemanis pengganti. Glukosa dapat dihidrolisis lebih lanjut menjadi furfural dan hidroksimetil furfural (HMF). Hidroksimetil furfural dapat menjadi bahan baku dimetilformamida (DMF), yaitu senyawa organik yang sering digunakan sebagai pelarut. Selain itu, HMF juga dapat digunakan sebagai bahan baku resin nilon. Hidrolisis lebih lanjut dari HMF menghasilkan asam levulinat yang bermanfaat sebagai bahan baku poliester.

Hemiselulosa dapat dihidrolisis menghasilkan asam asetat, asam uronat dan monomer-monomer gula sederhana seperti glukosa, manosa, arabinosa, galaktosa, dan xilosa. Sama seperti glukosa, xilosa juga dapat dihidrogenasi menjadi gula alkohol yang sering dikenal dengan nama xilitol. Xilitol adalah pemanis pengganti yang tidak dapat diasimilasi oleh bakteri di mulut sehingga dapat mengurangi kerusakan gigi. Monomer gula sederhana ini juga dapat difermentasi menghasilkan produk-produk serupa seperti pada fermentasi glukosa. Gula beratom karbon lima (pentosa) seperti xilosa dan arabinosa dapat dihidrolisis lebih lanjut menjadi furfural. Furfural dapat dikonversi menjadi tetra hidro furan yang berguna sebagai bahan baku nilon; atau sebagai bahan baku pembuatan resin dan plastik (Baruah et al., 2018).

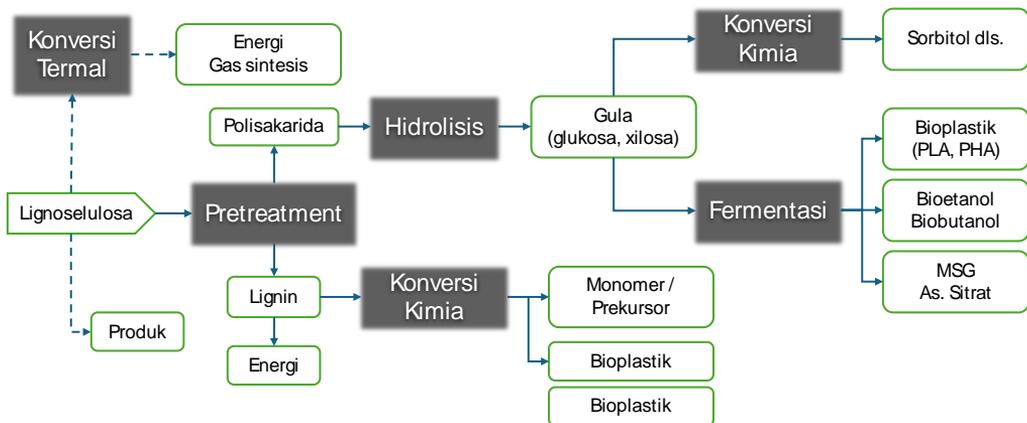
Lignin merupakan polimer dari senyawa-senyawa fenolik sehingga hidrolisis dari lignin menghasilkan senyawa-senyawa seperti fenol, vanilin, benzen, toluen dan xilen (BTX). Lignin juga dapat diolah menjadi resin; digasifikasi menghasilkan gas sintesis yang berguna sebagai bahan baku berbagai produk turunannya; atau langsung dibakar sebagai bahan bakar (ini biasa dilakukan di pabrik kertas kraft). Penelitian fraksionasi lignin tengah dilaksanakan secara insentif guna menemukan bahan-bahan turunan baru yang berdaya-guna dan bernilai tinggi (Meng et al., n.d.; Yuan et al., 2021).

3. TEKNOLOGI PENGOLAHAN LIGNOSELULOSA

Lignoselulosa adalah bahan yang memiliki potensi yang besar sebagai bahan baku industri ataupun produk komersial bernilai tinggi. Dengan jumlah yang sangat melimpah, lignoselulosa sangat berperan menggantikan posisi minyak bumi sebagai bahan baku industri, bahan bakar, maupun produk-produk turunan petrokimia seperti plastik, pelarut dan lain sebagainya. Tujuan ini hanya dapat dicapai apabila proses maupun sistem pemroses yang diperlukan tersedia dan siap diaplikasikan. Pengembangan proses dan sistem pemroses ini masih terus diteliti dan dikembangkan oleh para peneliti di perguruan tinggi, lembaga riset, dan industri.

3.1 Ekosistem Industri Berbahan-baku Lignoselulosa

Pemanfaatan lignoselulosa dapat melalui beberapa jalur antara lain: jalur konversi termal; jalur konversi kima; ataupun penggunaan secara langsung (Gambar 5). Penggunaan bahan lignoselulosa secara langsung sudah dilakukan sejak dahulu, misalnya penggunaan merang padi sebagai bahan baku pembuatan tikar, serbuk gergaji sebagai media pertumbuhan jamur dan lain sebagainya.



Gambar 5 Ekosistem industri berbasis bahan baku lignoselulosa. Proses *pretreatment* dan hidrolisis adalah proses awal dan utama dalam mewujudkan ekosistem ini.

Pemanfaatan lignoselulosa melalui jalur konversi termal biasanya melibatkan salah satu dari tiga proses: pembakaran; gasifikasi; atau pirolisis. Proses pembakaran biasanya menghasilkan panas yang kemudian digunakan

langsung atau dikonversi lebih lanjut menjadi energi lain seperti gerak (pada turbin), atau listrik (generator). Pada proses gasifikasi, lignoselulosa dibakar secara parsial dengan oksigen terbatas untuk menghasilkan gas-gas sintesis (CO , CO_2 , H_2 , H_2O). Gas-gas ini dapat langsung digunakan dalam mesin bakar termodifikasi, atau menjadi gas prekursor bagi reaksi-reaksi pembentukan produk kimia tertentu seperti amoniak, metanol, dan lain sebagainya (Da Costa Sousa et al., 2009; Silveira et al., 2015).

Proses konversi lignoselulosa secara kimia umumnya melalui dua tahap proses yaitu *pretreatment* dan hidrolisis. Proses *pretreatment* bertujuan untuk membuka struktur lignoselulosa di mana selulosa terikat oleh hemiselulosa dan diselimuti oleh lignin. Berbagai metode *pretreatment* telah dikembangkan dengan berbagai tujuan seperti pemisahan lignin, mengambil hemiselulosa ataupun sekaligus melaksanakan hidrolisis secara kimiawi (Mosier, 2005; Sun and Cheng, 2002). Lignin yang berhasil dipisahkan dapat digunakan langsung sebagai energi seperti yang terjadi di pabrik kertas kraft. Namun, lignin dapat juga dikonversi lebih lanjut menjadi monomer-monomernya dan disintesis kembali menjadi bahan-bahan bernilai tinggi lainnya seperti pelarut (benzen, toluen, xilen), vanilin, bioplastik dan lain sebagainya. Hemiselulosa dan selulosa dapat dihidrolisis lebih lanjut menjadi monomer xilosa dan glukosa menggunakan enzim yang bekerja secara spesifik. Monomer gula ini dapat diolah langsung secara kimia menghasilkan produk-produk lainnya. Sebagai contoh, xilosa, dan glukosa dapat dihidrogenasi menjadi xilitol dan sorbitol - pemanis buatan yang tidak dicerna oleh tubuh maupun mikroorganisme (García-Ochoa et al., 2000). Pemanis ini dapat mencegah kerusakan gigi dan juga bermanfaat sebagai pemanis bagi penderita diabetes. Xilosa maupun glukosa juga dapat digunakan sebagai substrat fermentasi untuk menghasilkan produk-produk turunan seperti bioetanol, biobutanol, asam sitrat, asam susinat, asam laktat (prekursor polylactic acid PLA - bioplastik), monosodium glutamat (MSG), polihidroksi alkanoat (PHA - bioplastik), dan produk-produk fermentasi lainnya yang sangat beragam.

Pembahasan berikut difokuskan kepada metode *pretreatment* dan hidrolisis. Terdapat beragam metode *pretreatment* dan hidrolisis yang telah dikembangkan oleh para peneliti, namun dalam pembahasan ini tidak semua metode tersebut dibahas. Beberapa metode umum dan sering digunakan yang dibahas pada paparan berikut ini.

3.2 *Pretreatment*

Pretreatment lignoselulosa adalah sebuah langkah penting dalam konversi lignoselulosa menjadi produk bernilai tinggi. Lignoselulosa memiliki struktur kompleks dan tahan terhadap dekomposisi alami, sehingga memerlukan proses *pretreatment* untuk memecah struktur ini dan meningkatkan efisiensi pengolahan lebih lanjut (Mosier, 2005; Sun and Cheng, 2002).

Tujuan utama *pretreatment* adalah mengubah struktur fisik dan kimia lignoselulosa sehingga komponen-komponen penyusunnya dapat lebih mudah diakses oleh enzim maupun mikroorganisme pada proses konversi selanjutnya. Secara khusus, *pretreatment* bertujuan untuk:

1. **Memisahkan lignin:** Lignin adalah komponen yang berfungsi melindungi selulosa dari degradasi. Memisahkan lignin dari selulosa dan hemiselulosa merupakan langkah penting agar selulosa dan hemiselulosa dapat lebih mudah dihidrolisis.
2. **Memecah hemiselulosa:** Hemiselulosa yang mengikat selulosa harus dipecah dan dipisahkan agar selulosa dapat dengan mudah dihidrolisis. Di sisi lain, hemiselulosa dapat dipisahkan sehingga dapat dihidrolisis lebih lanjut menjadi gula sederhana penyusunnya.
3. **Memecah ikatan selulosa:** serat-serat selulosa yang bersatu membentuk fibril sulit diakses oleh enzim yang menghidrolisis selulosa. Apabila bentuk fibril ini dapat diurai, maka enzim lebih mudah mengakses serat selulosa dan menghidrolisisnya.

Ada berbagai metode *pretreatment* yang dapat digunakan, masing-masing dengan kelebihan dan kekurangannya. Secara umum, metode-metode ini dibagi menjadi beberapa kategori: fisik, kimia, biologis, dan kombinasi dari ketiganya.

3.2.1 *Pretreatment* Fisik

3.2.1.1 Penggilingan (*milling*)

Lignoselulosa digiling dan dihancurkan menjadi partikel-partikel kecil untuk meningkatkan luas permukaan. Metode ini sudah ditinggalkan karena terbukti bahwa penggilingan tidak mampu melucuti lignin maupun memutuskan ikatan kimia antar monomer selulosa maupun hemiselulosa (Sun and Cheng, 2002).

3.2.1.2 Ledakan kukus (*steam explosion*)

Metode ledakan kukus dilaksanakan dengan memanaskan bahan lignoselulosa menggunakan kukus pada tekanan yang cukup tinggi di dalam sebuah reaktor tertutup. Reaktor kemudian dibuka secara tiba-tiba sehingga semua isi reaktor keluar akibat perbedaan tekanan. Air yang semula ada di antara serat-serat selulosa dan hemiselulosa menguap dalam sekejap dan merusak struktur lignoselulosa. Akibat perlakuan ini, lignoselulosa menjadi mudah diakses oleh enzim pada saat proses hidrolisis (Mosier, 2005; Sun and Cheng, 2002).

3.2.2 *Pretreatment* Kimia

3.2.2.1 Asam (*acid*)

Pengolahan dengan asam adalah salah satu metode yang efektif untuk memecah lignoselulosa menjadi komponen-komponennya. Proses ini biasanya menggunakan larutan asam yang encer (konsentrasi rendah) pada temperatur yang relatif tinggi (120-200 °C) dengan target pemutusan ikatan-ikatan antar karbon pada hemiselulosa dan lignin. Pemutusan ikatan ini diharapkan dapat membuka akses enzim ke rantai selulosa pada proses hidrolisis (Saha et al., 2008; Sun and Cheng, 2002).

Beberapa keunggulan dari metode ini antara lain adalah: waktu proses yang cepat; penggunaan bahan kimia yang relatif murah; dan efektif dalam memecah hemiselulosa. Namun, proses ini menghasilkan produk samping seperti furfural dan 5-hidroksimetil furfural (HMF) yang bersifat inhibitor bagi sebagian mikroorganisme. Selain itu, penggunaan asam kuat cenderung mengakibatkan korosi sehingga peralatan yang digunakan harus tahan terhadap tingkat keasaman yang tinggi.

Pretreatment asam banyak digunakan dalam produksi bioetanol generasi kedua. Produk samping yang bersifat inhibitor dapat disingkirkan melalui proses detoksifikasi seperti perlakuan dengan kapur (*overliming*), adsorpsi dengan karbon-aktif atau resin penukar-ion (Martinez et al., 2000; Purwadi et al., 2004). Walaupun proses detoksifikasi ini masih menyisakan beberapa masalah yang harus diselesaikan, cara ini sangat efektif dalam menghilangkan efek inhibisi dari hasil *pretreatment*.

3.2.2.2 Basa (*alkali*)

Pengolahan basa menggunakan larutan basa seperti NaOH atau $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dengan tujuan untuk merusak/melarutkan lignin di permukaan lignoselulosa. Dengan hilangnya sebagian lignin di permukaan lignoselulosa, maka hemiselulosa dan selulosa menjadi terbuka terhadap akses enzim dalam proses hidrolisis. Pengolahan dengan basa ini dilaksanakan pada temperatur yang relatif lebih rendah (50-150 °C) dibandingkan dengan kondisi pengolahan asam namun dengan waktu yang relatif lebih lama. Basa seperti NaOH sangat efektif dalam memecah ikatan ester antara lignin dan hemiselulosa, sehingga struktur lignoselulosa lebih mudah diakses. *Pretreatment* basa juga tidak menghasilkan furfural dan HMF seperti halnya pada *pretreatment* asam, namun sebagian senyawa fenolik hasil degradasi lignin oleh senyawa basa dapat bersifat racun bagi beberapa mikroorganisme (Sun and Cheng, 2005).

Beberapa hal yang perlu dicermati pada mengolah basa antara lain adalah bahwa penggunaan basa yang intensif pada proses pengolahan lignoselulosa ini memerlukan daur ulang basa, terutama untuk menghemat biaya operasi dan mengurangi dampak lingkungan. Selain itu, proses pengolahan basa yang tidak terkendali dapat mengakibatkan degradasi selulosa sehingga menurunkan perolehan gula di tahap hidrolisis.

3.2.2.3 Amoniak (*ammonia fiber explosion – AFEX*)

Pengolahan ini menggunakan amonia anhidrat pada tekanan dan temperatur tinggi untuk memecah struktur selulosa. Metode ini mirip dengan *steam explosion* di mana amonia diinjeksikan ke dalam reaktor yang berisi lignoselulosa, kemudian tekanan dilepaskan secara tiba-tiba. Hasilnya menyebabkan pecahnya struktur selulosa, hemiselulosa dan lignin, sehingga komponen-komponen ini mudah diakses oleh enzim pada proses hidrolisis. Proses AFEX lebih ringan dibandingkan *steam explosion* sehingga komponen-komponen lignoselulosa relatif masih utuh walaupun strukturnya telah dirusak oleh ledakan amonia. Hal ini memungkinkan konversi selulosa dan hemiselulosa menjadi glukosa dan xilosa yang lebih efisien. Selain itu, AFEX juga tidak menghasilkan produk samping yang bersifat racun seperti furfural dan HMF (Silveira et al., 2015; Sun and Cheng, 2002).

Salah satu keunggulan metode AFEX adalah bahwa amonia yang digunakan dapat sepenuhnya didaur ulang sehingga dapat menghemat biaya operasional dan dampak lingkungan. Namun beberapa tantangan dalam

penerapan AFEX antara lain biaya awal yang tinggi, infrastruktur reaktor tekanan tinggi dan fasilitas penyimpanan amonia dalam jumlah besar. Beberapa bahan lignoselulosa dengan kandungan lignin yang tinggi tidak cocok diolah dengan metode ini sehingga memerlukan penyesuaian agar hasilnya optimal.

3.2.3 Pretreatment Biologis

Perlakuan biologis melibatkan penggunaan mikroorganisme (jamur pelapuk putih - *white-rot fungi*) atau enzim (*laccase enzymes*) yang mampu mendegradasi lignin sehingga akses ke hemiselulosa dan selulosa terbuka. Metode ini dilaksanakan pada kondisi lunak (temperatur dan tekanan ambien) sehingga lebih ramah lingkungan dan hemat energi. Walaupun demikian, proses biologis biasanya membutuhkan waktu yang cukup lama dibandingkan dengan metode *pretreatment* kimia atau fisik (Ballesteros et al., 2002; El-Zawawy et al., 2011; Sun and Cheng, 2002).

3.2.4 Pretreatment Termokimia

3.2.4.1 Hidrotermal

Pengolahan ini menggunakan air untuk mengolah lignoselulosa pada temperatur antara 160-240 °C dan tekanan tinggi sehingga air masih berada pada fasa cairnya. Air panas memecah dan melarutkan hemiselulosa dan memodifikasi lignin sehingga selulosa lebih mudah diakses oleh enzim di tahap hidrolisis. Salah satu keunggulan metode ini adalah bahwa metode ini tidak menggunakan bahan kimia tambahan sehingga lebih ramah lingkungan. Air panas dapat melarutkan hemiselulosa sekaligus mendegradasi menjadi gula pentosa, sedangkan sebagian lignin larut ke dalam air sehingga membuka akses bagi enzim untuk menghidrolisis selulosa. Pada kondisi proses yang tepat, metode hidrotermal dapat menekan pembentukan senyawa-senyawa racun seperti asam asetat, furfural dan senyawa fenolik dari degradasi lignin. Salah satu tantangan dari pengolahan hidrotermal adalah penggunaan energi yang cukup tinggi untuk memanaskan air dan mempertahankannya pada tekanan tinggi selama proses (Mosier, 2005; Sun and Cheng, 2002).

3.2.4.1 Organosolv

Pengolahan ini menggunakan pelarut organik seperti etanol, metanol, aseton atau asam organik lainnya pada temperatur tinggi (150-200 °C) dan tekanan sedang. Tujuan utama metode ini adalah melarutkan dan memisahkan lignin sehingga selulosa dan hemiselulosa lebih mudah diakses oleh enzim pada proses hidrolisis. Keunggulan metode ini adalah kemampuannya dalam menghasilkan lignin yang relatif murni sehingga dapat digunakan pada berbagai aplikasi industri seperti produksi bahan kimia, resin atau bahan bakar. Di samping itu, hasil pengolahan *organosolv* juga menghasilkan produk padat berupa selulosa dan hemiselulosa yang lebih mudah untuk diolah lebih lanjut (Domínguez et al., 2018; Islam et al., 2021; Labauze et al., 2022; Sidiras et al., 2022).

Pelarut yang digunakan dalam pengolahan *organosolv* dapat didaur ulang dan digunakan kembali sehingga menghemat biaya penyediaan pelarut dan dampak lingkungan. Selain itu, proses ini juga menghasilkan lebih sedikit senyawa beracun seperti furfural dan HMF dibandingkan dengan proses kimia lainnya. Namun, pengolahan *organosolv* memerlukan biaya awal yang tinggi, peralatan khusus yang mampu beroperasi pada tekanan tinggi, dan ongkos tambahan untuk mendaur ulang pelarut (Labauze and Benjelloun-Mlayah, 2021).

Salah satu tantangan utama dalam *pretreatment* lignoselulosa adalah biaya energi dan bahan kimia yang tinggi. Selain itu, metode *pretreatment* yang menggunakan senyawa kimia dapat menghasilkan produk samping yang bersifat racun terhadap mikroba kerja pada proses fermentasi. Peluang untuk mengembangkan metode *pretreatment* yang efisien, murah dan ramah lingkungan sangat terbuka lebar. Berbagai upaya seperti pengembangan enzim yang lebih efektif dalam menghilangkan lignin; kombinasi metode fisik-kimia yang lebih efisien namun ramah lingkungan; serta teknologi detoksifikasi yang tepat; masih terus dikembangkan (Mosier, 2005; Sun and Cheng, 2002).

3.3 Hidrolisis

Hidrolisis adalah proses pemecahan komponen utama lignoselulosa, yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin – menjadi gula-gula sederhana, seperti glukosa, xilosa, arabinosa, manosa, dan galaktosa; maupun senyawa-senyawa

fenolik hasil dekomposisi lignin. Proses hidrolisis dapat dilaksanakan secara termal, kimia maupun enzimatik, namun hanya dua metode yang umum digunakan secara luas yaitu hidrolisis asam-encer dan hidrolisis enzimatik. Kedua metode hidrolisis tersebut dibahas secara singkat berikut.

3.3.1 Hidrolisis Asam-encer

Hidrolisis asam-encer (*dilute-acid hydrolysis*) adalah metode hidrolisis yang sudah dikenal sejak perang dunia ke-2 (Saeman, 1945). Proses ini menggunakan asam sulfat dengan konsentrasi rendah (0.1 sampai 2%-berat) di mana ion H^+ menjadi katalis dalam reaksi pemutusan ikatan kimia oleh air. Proses hidrolisis asam-encer ini dilaksanakan pada temperatur tinggi 120-240 °C agar reaksi hidrolisis dapat berlangsung cepat. Tujuan utama hidrolisis ini adalah pemutusan ikatan glikosidik dalam polimer karbohidrat. Hemiselulosa lebih mudah terhidrolisis dibandingkan dengan selulosa karena struktur hemiselulosa lebih bersifat amorf sedangkan struktur selulosa lebih bersifat kristalin (Labauze and Benjelloun-Mlayah, 2021; Sun and Cheng, 2005).

Proses hidrolisis asam-encer biasanya dilaksanakan dua tahap, di mana tahap pertama berlangsung pada temperatur yang lebih rendah (120-170 °C) dengan tujuan hidrolisis hemiselulosa menjadi monomer gula yang didominasi oleh gula-gula pentan (gula C5 – xilosa dan arabinosa). Gula ini larut dalam larutan asam dan dipisahkan dari padatan yang kaya dengan selulosa. Selanjutnya, padatan selulosa dihidrolisis lebih lanjut pada temperatur yang lebih tinggi (200-240 °C) untuk mendegradasi selulosa menjadi gula hexan (C6 - glukosa).

Salah satu kelemahan hidrolisis asam encer adalah terbentuknya senyawa-senyawa racun bagi mikroorganisme. Katalis asam bekerja sangat reaktif sehingga bukan saja reaksi pemutusan ikatan glikosidik yang terjadi tetapi juga memutuskan ikatan-ikatan kimia lain. Sebagai contoh, katalis asam dapat mendegradasi molekul gula-gula sederhana seperti xilosa dan glukosa menghasilkan furfural dan 5-hidroksimetil furfural (HMF). Karena itu, hidrolisis asam biasanya dilaksanakan relatif singkat untuk mencegah terbentuknya senyawa-senyawa racun ini (Larsson et al., 1999; Luo et al., 2002; Taherzadeh et al., 1999).

Hidrolisis asam-encer dipilih karena biaya operasi yang murah. Namun, beberapa kelemahan seperti terbentuknya senyawa racun, kebutuhan energi

pemanasan, dan peralatan yang tahan terhadap asam perlu dipertimbangkan pada saat aplikasi metode ini. Selain itu, penggunaan asam menyebabkan pH larutan rendah sehingga netralisasi larutan ini membutuhkan larutan basa yang cukup banyak.

3.3.2 Hidrolisis Enzimatik

Hidrolisis enzimatik adalah metode hidrolisis yang memanfaatkan enzim-enzim untuk memecah komponen lignoselulosa terutama hemiselulosa dan selulosa menjadi monomer-monomer gula penyusunnya. Metode ini merupakan salah satu metode yang efisien dan ramah lingkungan. Enzim yang digunakan dalam hidrolisis hemiselulosa adalah enzim xylanase sedangkan enzim selulase digunakan untuk menghidrolisis selulosa. Proses hidrolisis enzimatik berlangsung pada kondisi ringan, seperti temperatur sedang dan pH relatif netral. Dengan demikian proses ini lebih hemat energi (Aita et al., 2011; Ali et al., 2014; Ballesteros et al., 2002; Silva, 2015).

Salah satu keunggulan dari hidrolisis enzimatik ini adalah kerja enzim yang sangat spesifik sehingga tidak menghasilkan produk samping yang dapat mengganggu proses fermentasi selanjutnya. Walaupun demikian, laju reaksi enzimatik relatif lambat sehingga untuk pencapaian tingkat konversi yang tinggi membutuhkan waktu yang cukup lama.

Enzim yang digunakan dalam hidrolisis enzimatik adalah enzim kompleks – yaitu campuran berbagai jenis enzim yang memiliki fungsi yang berbeda. Sebagai contoh, enzim kompleks untuk menghidrolisis selulosa paling tidak mengandung tiga jenis enzim, yaitu endoglukanase, eksoglukanase (selobiohidrolase), dan β -glukosidase. Enzim endoglukanase berfungsi untuk memutus ikatan glikosidik pada selulosa secara acak sehingga menghasilkan potongan-potongan selulosa yang lebih pendek. Enzim eksoglukanase (atau selobiohidrolase) bekerja di ujung-ujung potongan-potongan selulosa menghasilkan disakarida selobiosa (dua unit glukosa dengan ikatan β -1,4 glikosidik). Selanjutnya, enzim β -glukosidase memutus ikatan β -1,4 glikosidik pada selobiosa menghasilkan glukosa. Kerja sama antara ketiga enzim ini sangat penting dalam mencapai konversi selulosa menjadi glukosa secara efisien (Haghighi Mood et al., 2013; Kumar et al., 2009; Walker and Wilson, 1991).

Salah satu tantangan terbesar dari hidrolisis enzimatis ini adalah harga enzim yang mahal. Hal ini disebabkan karena enzim diproduksi sangat terbatas oleh mikroorganisme sehingga biaya pemisahan enzim menjadi mahal. Terobosan di bidang bioteknologi yaitu membuat mikroorganisme rekombinan penghasil enzim tertentu merupakan salah satu solusi yang dapat menurunkan harga enzim. Namun, penguasaan teknologi ini sangat terbatas sehingga akses untuk industrialisasi enzim secara komersial pun masih sangat terbatas.

4. PENGEMBANGAN PROSES PENGOLAHAN LIGNOSELULOSA

Pengembangan proses pengolahan lignoselulosa di ITB diawali dengan kerja sama antara Teknik Kimia FTI-ITB dengan PT Rekayasa Industri untuk menciptakan sebuah lisensi proses pengolahan bahan lignoselulosa menjadi bioetanol sebagai bahan bakar. PT Rekayasa Industri sebagai perusahaan BUMN yang bergerak di bidang perancangan dan pembangunan pabrik kimia (*Engineering, Procurement & Construction* - EPC) merasa perlu memiliki sebuah lisensi pabrik bioetanol generasi ke-2 karena Indonesia memiliki sumber bahan lignoselulosa yang melimpah. Hal ini menjawab tantangan kebutuhan bioetanol yang meningkat sebagai substitusi bahan bakar fosil yang persediaannya semakin menipis.

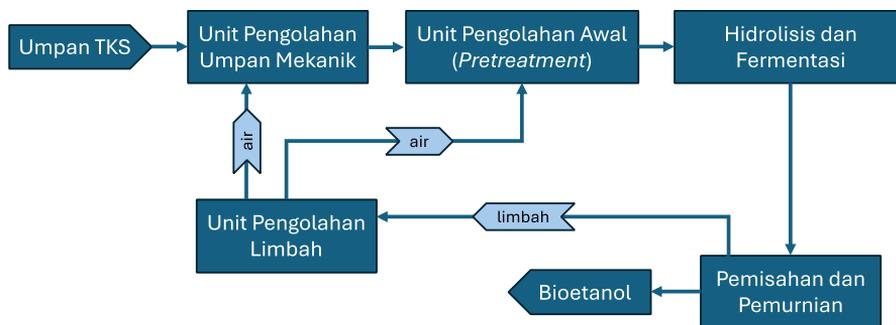
Pengembangan ini diawali dengan sebuah studi rancangan konseptual proses untuk pabrik bioetanol berbasis lignoselulosa. Kajian tentang ketersediaan bahan baku, pemilihan proses dan kondisi operasi, hingga perhitungan biaya kapital dan ongkos produksi, dilaksanakan dalam studi ini. Setelah studi tentang rancangan konseptual, ITB dan PT Rekayasa Industri melanjutkan kerja sama untuk melakukan "*reserve engineering*" dari tiga tahapan utama proses produksi bioetanol dari lignoselulosa, yaitu *pretreatment*; hidrolisis; dan fermentasi. Hasil dari studi ini antara lain adalah pengetahuan dan pengalaman pengoperasian tahapan-tahapan utama tersebut.

Berdasarkan pengetahuan dan pengalaman ini, perancangan proses dan sistem pemroses dilakukan untuk mendapatkan hasil yang lebih baik. Sebuah pabrik pilot skala 125 kg bahan lignoselulosa per batch telah dibangun di Cikaret, Bogor dan telah diresmikan oleh Menteri Perindustrian RI Agus Gumiwang pada bulan Agustus 2024 yang lalu. Pabrik ini dibangun atas kerja sama antara: ITB; PT Rekayasa Industri; dan Balai Besar Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri Agro - Kementerian Perindustrian RI; dan didanai oleh Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS).

Penjelasan rinci tentang pengembangan tahapan-tahapan proses terutama proses *pretreatment* dan hidrolisis enzimatis disajikan pada subbab berikut.

4.1 Studi Rancangan Konseptual

Tujuan dari studi perancangan konseptual pabrik bioetanol generasi ke-2 (berbahan baku tandan kosong sawit - TKS) adalah untuk menguji kelengkapan informasi teknis yang diperlukan dalam perancangan pabrik, memperkirakan biaya investasi dan operasi pabrik menggunakan teknologi terpilih. Berdasarkan studi literatur awal, tahapan proses utama meliputi: (1) penanganan dan penyimpanan umpan; (2) pengolahan awal dan hidrolisis; (3) fermentasi; (4) pemurnian produk bioetanol; dan (5) pengolahan limbah (Gambar 6).



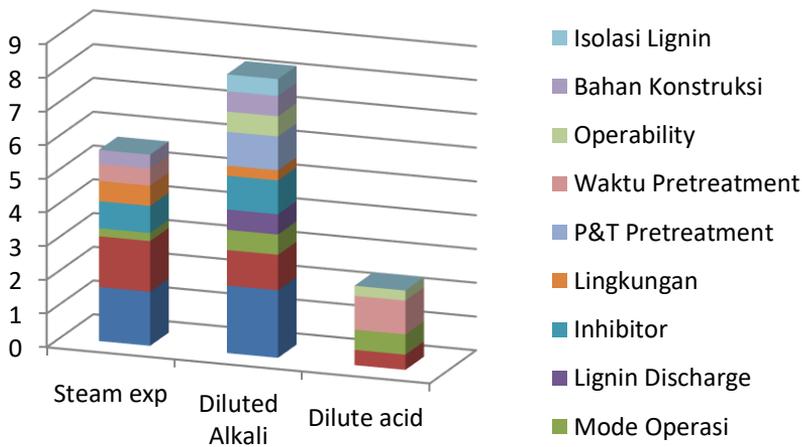
Gambar 6 Skema dasar proses produksi bioetanol dari tandan kosong sawit (TKS).

Terdapat tiga skenario produksi bioetanol dari TKS yang diadopsi dari berbagai literatur, yaitu:

1. Pengolahan awal (*pretreatment*) menggunakan alkali encer (*dilute-alkali*), dilanjutkan dengan hidrolisis enzimatis dan fermentasi.
2. Pengolahan awal menggunakan ledakan kukus (*steam explosion*), dilanjutkan dengan hidrolisis enzimatis dan fermentasi.
3. Hidrolisis asam-encer (*dilute-acid*) dua tahap dengan menggunakan asam sulfat di mana sebagian besar selulosa terhidrolisis, dilanjutkan dengan detoksifikasi dan fermentasi.

Pemilihan skenario didasarkan pada hasil simulasi proses dari ketiga alternatif di atas. Spesifikasi umpan diperoleh dari literatur dan spesifikasi produk menggunakan standar SNI 7390:2008 tentang bioetanol terdenaturasi untuk gasohol. Asumsi-asumsi yang digunakan antara lain adalah kapasitas pabrik 60.000 kL etanol/tahun, pabrik diasumsikan bekerja selama 330 hari per tahun, umur pabrik 20 tahun, nilai akhir pabrik (*salvage value*) adalah nol, modal berupa 30% *equity* dan 70% pinjaman bank, dan bunga sebesar 8% per

tahun. Parameter pembobotan antara lain adalah GPM (*gross-profit margin*), gula yang hilang (*sugar loss*), inhibitor pada proses fermentasi, kondisi operasi *pretreatment* (P dan T), waktu *pretreatment*, mode operasi, *lignin discharge*, operabilitas, bahan konstruksi, lingkungan, dan kemungkinan isolasi lignin. Masing-masing parameter memiliki bobot yang berbeda-beda sesuai dengan pengaruhnya terhadap proses keseluruhan.



Gambar 7 Evaluasi perbandingan proses produksi etanol dari TKS.

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa skenario dengan pengolahan awal alkali-encer mengungguli dua skenario lainnya (Gambar 7). Kriteria yang penting dalam proses evaluasi ini antara lain adalah: GPM, yaitu faktor keekonomian yang menentukan pilihan karena merepresentasikan besar keuntungan; dan kondisi operasi, yaitu faktor yang berhubungan dengan kebutuhan energi, bahan konstruksi dan operabilitas. Skenario asam-encer menghasilkan point rendah karena menghasilkan inhibitor bagi fermentasi, tidak ramah lingkungan dan membutuhkan bahan konstruksi yang relatif mahal akibat sifat korosif dari asam yang digunakan.

Dengan rancangan konseptual ini, arah penelitian dan pengembangan proses produksi bioetanol dari lignoselulosa ditetapkan. ITB dan PT Rekayasa Industri sepakat untuk melaksanakan penelitian-penelitian lebih lanjut tentang proses *pretreatment* menggunakan alkali-encer, proses hidrolisis enzimatik dan fermentasi bioetanol. Selain penelitian-penelitian dalam kerangka kerja sama ITB - PT Rekayasa Industri, beberapa penelitian lain yang

berkaitan juga dilaksanakan dalam kerangka akademik oleh mahasiswa program sarjana dan magister ITB.

4.2 Proses *Pretreatment*

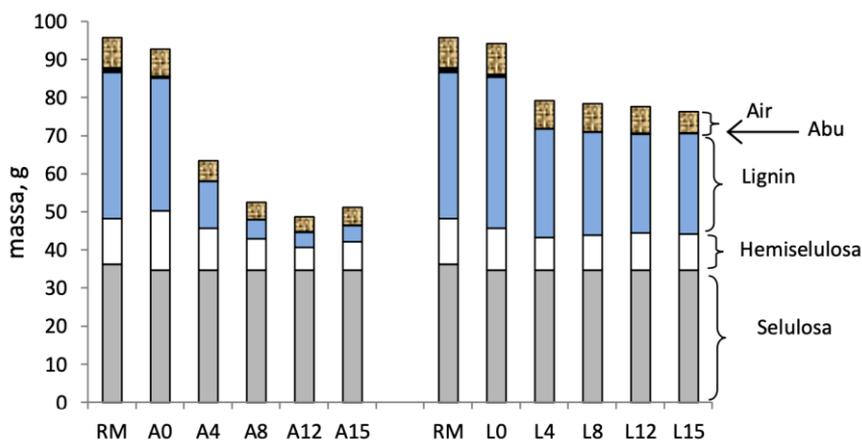
4.2.1 Penelitian Pendahuluan

Penelitian dan pengembangan proses *pretreatment* dengan basa-encer diawali oleh penelitian tesis dari salah satu mahasiswa Magister Teknik Kimia (Joko Waluyo). Penelitian ini membandingkan dua proses pengolahan awal, yaitu:

1. *Low Temperature Alkali* (LTA) - TKS direndam dalam larutan NaOH dengan perbandingan 1:8 selama 24 jam di dalam erlenmeyer pada kondisi atmosferik. Padatan yang dihasilkan kemudian dicuci hingga pH netral, dikeringkan dan disimpan untuk pengujian.
2. *Alkali Fiber Explosion* (ALFEX) - pengolahan awal ini dilaksanakan dalam reaktor skala 5 liter yang dilengkapi dengan pengaduk dan pemanas. TKS dan larutan NaOH dengan perbandingan 1:8 dimasukkan ke dalam reaktor ALFEX (ex. Korea - di laboratorium BRIN). Reaktor dalam keadaan tertutup dipanaskan hingga temperatur 150 °C, 4 bar selama 30 menit. Setelah kondisi operasi tercapai, reaktor dibuka secara mendadak sehingga seluruh isi reaktor berpindah ke tangki lain yang lebih besar (*explosion*). Padatan yang dihasilkan kemudian dicuci hingga pH netral, dikeringkan dan disimpan untuk pengujian.

Konsentrasi larutan NaOH yang digunakan adalah 0, 4, 8, 12 dan 15%-berat, sedangkan temperatur, tekanan, dan waktu operasi merupakan variabel tetap.

Hasil percobaan menunjukkan bahwa larutan basa dapat melarutkan lignin, tetapi tidak mengubah kandungan selulosa. Kelarutan lignin dalam larutan basa semakin tinggi dengan meningkatnya konsentrasi basa, sedangkan efek temperatur tinggi pada ALFEX meningkatkan kelarutan lignin secara signifikan (Gambar 8). Semakin banyak lignin yang terlarut di dalam basa menunjukkan bahwa perlindungan lignin terhadap hemiselulosa dan selulosa semakin berkurang. Dengan demikian, struktur lignoselulosa semakin terbuka terhadap akses enzim untuk mendegradasi hemiselulosa dan selulosa.



Gambar 8 Massa komponen lignoselulosa TKS: RM (awal); A - proses ALFEX; L - proses LTA; angka menyatakan konsentrasi NaOH (%-berat).

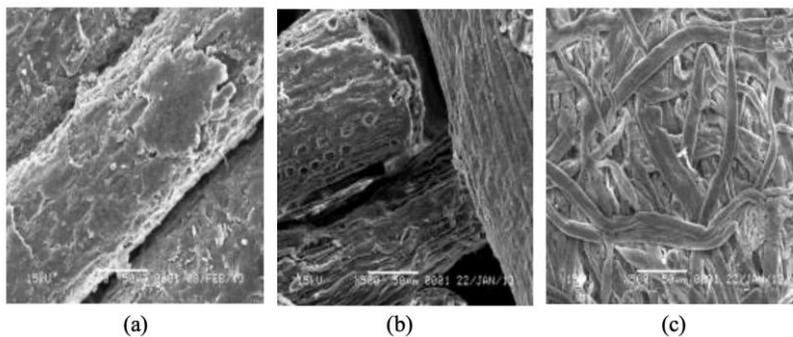
Pengolahan awal dengan basa ini juga memengaruhi kristalinitas dari selulosa. Semakin tinggi kristalinitas selulosa, semakin sulit proses degradasinya. Kristalinitas serat TKS hasil *pretreatment* dianalisa menggunakan XRD (Bruker model D8-Advance) dan hasilnya dinyatakan dalam persen kristalinitas (Tabel 3). Serat TKS dipindai dengan sumber radiasi pada rentang sudut 2θ mulai $5-50^\circ$ dengan kecepatan pindai $1,45^\circ/\text{menit}$ dan jarak tingkatan $0,019^\circ$. Sumber radiasi yang digunakan berasal dari $\text{CuK}\alpha$ dengan panjang gelombang $1,54 \text{ nm}$ dan dioperasikan pada 35 kV , 40 mA . Hasil pengukuran kristalinitas menunjukkan bahwa penggunaan larutan NaOH pada pengolahan awal lignoselulosa dapat menurunkan kristalinitas hingga 50%. Natrium hidroksida yang digunakan dalam *pretreatment* ALFEX dan LTA diduga mampu merusak struktur teratur dari fraksi kristalin selulosa TKS sehingga kestabilan kristal menjadi terganggu. Penurunan kristalinitas ini justru meningkatkan kemudahan akses enzim dalam mendegradasi selulosa dan hemicelulosa pada proses hidrolisis.

Tabel 3 Kristalinitas TKS sebelum (RM) dan setelah *pretreatment* ALFEX dan LTA pada konsentrasi NaOH 0, 4, 8, 12 dan 15%-berat.

<i>Pretreatment</i> ALFEX	Kristalinitas (%)	<i>Pretreatment</i> LTA	Kristalinitas (%)
RM	57,6	RM	57,6
A0	39,3	L0	44,3
A4	42,3	L4	43,7
A8	40,8	L8	37,2
A12	28,6	L12	31,3
A15	32,6	L15	29,1

Konfirmasi penurunan kandungan lignin dan penurunan kristalinitas dari hasil olahan ALFEX dan LTA dilakukan dengan uji morfologi permukaan TKS. Uji morfologi ini dilaksanakan menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) di Pusat Survei Geologi Bandung dengan spesifikasi JEOL JSM-6360LA. Sampel TKS dipreparasi dengan cara memberi lapisan tipis emas menggunakan alat bantu *ion sputter coater*. Tujuan preparasi ini agar serat TKS bersifat konduktor dan mencegah terjadinya penurunan atau kenaikan muatan sampel. SEM dioperasikan pada tegangan 15 kV. Pemotretan hasil SEM dilakukan terhadap serat TKS awal dan serat TKS yang telah diolah menggunakan metode ALFEX dan LTA dengan konsentrasi NaOH 8% saja. Pemotretan dilakukan pada perbesaran 500 kali (Gambar 9).

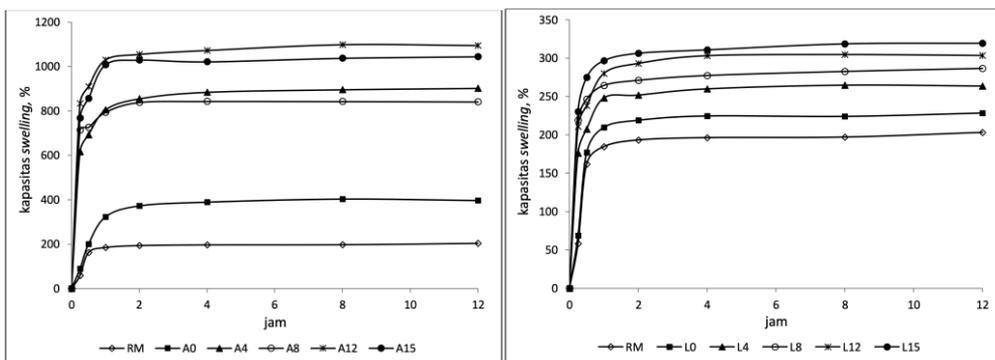
Gambar 9 (a) menunjukkan serat TKS yang belum diolah memiliki struktur permukaan yang masih berbentuk fibril utuh (berkas serat selulosa) dengan kumpulan serat yang rapat. Fibril tersusun sejajar dan merekat satu dengan lain oleh serat hemiselulosa dan lignin. Gambar 9 (b) menunjukkan serat TKS yang telah diolah dengan metode LTA. Pada gambar ini terlihat bahwa serat masih tampak berbentuk fibril namun sudah terdapat celah antara fibril akibat larutnya lignin ke dalam larutan basa. Gambar 9 (c) menunjukkan serat TKS yang telah diolah dengan metode ALFEX. Pada gambar ini serat selulosa sudah tidak berbentuk fibril tetapi terurai menjadi serat-serat kecil dan memiliki orientasi yang tidak beraturan. Secara visual, serat TKS ini lebih halus, lembut, ringan dan berwarna lebih pucat dibandingkan dengan serat TKS awal atau serat TKS yang telah diolah dengan metode LTA. Hal ini bisa jadi disebabkan karena sebagian besar lignin telah larut ke dalam larutan NaOH.



Gambar 9 Foto morfologi permukaan TKS menggunakan SEM pada perbesaran 500 kali: (a) TKS sebelum *pretreatment*; (b) TKS setelah *pretreatment* LTA; dan (c) TKS setelah *pretreatment* ALFEX.

Hasil uji morfologi dari serat TKS hasil pengolahan ALFEX dan LTA menunjukkan bahwa efek ledakan (*explosion*) pada ALFEX mampu menguraikan jaringan internal serat TKS sehingga struktur serat TKS menjadi seperti spon/benang kusut. Pada saat terjadi ledakan, air yang berada di antara serat-serat tersebut menguap dengan cepat akibat penurunan tekanan mendadak. Penguapan air yang cepat ini menimbulkan peningkatan volume dan mendesak serat-serat yang melingkupinya. Energi yang dihasilkan juga cukup untuk memutus ikatan-ikatan (fisik/kimia) antar serat selulosa, antara selulosa dan hemiselulosa, maupun antara hemiselulosa dan lignin.

Lignoselulosa memiliki masalah terhadap penyerapan air yang rendah akibat adanya lignin yang bersifat hidrofobik. Sifat hidrofobik ini dapat menimbulkan masalah pada proses hidrolisis enzimatis karena air sebagai media pelarut enzim sulit mengantarkan enzim menuju serat-serat selulosa. Karena itu, kemampuan penyerapan air dari TKS hasil pengolahan ALFEX dan LTA perlu diukur dan diteliti. Hal ini dapat dilakukan melalui uji *swelling* - yaitu pengujian kemampuan bahan menyerap air. Kapasitas *swelling* dihitung berdasarkan rasio antara berat air yang dapat diserap (selisih TKS sebelum dan setelah perendaman) terhadap berat TKS kering awal. Kapasitas *swelling* diukur selama 48 jam, namun hasil pengukuran disajikan pada waktu hingga 12 jam saja karena kapasitas *swelling* pada jam ke-24 dan ke-48 sudah tidak berubah secara signifikan (Gambar 10).



Gambar 10 Kapasitas swelling serat TKS sebelum (RM) dan setelah *pretreatment* ALFEX (A) dan LTA (L) pada konsentrasi NaOH 0, 4, 8, 12, dan 15%

Hasil uji *swelling* menunjukkan bahwa kapasitas *swelling* meningkat dengan meningkatnya konsentrasi NaOH. Hal ini sejalan dengan uji sebelumnya yang menyatakan pengurangan kandungan lignin sebanding

dengan meningkatnya konsentrasi NaOH. Di sisi lain, perlakuan ALFEX mengubah struktur internal serat TKS sehingga meningkatkan kemampuan penyerapan air hingga sekitar 3 kali lebih besar. Hal ini memberi kemudahan bagi air dan enzim untuk masuk ke dalam struktur serat TKS dan melakukan degradasi pada proses hidrolisis.

4.2.2 Implementasi Skala Laboratorium

Hasil-hasil kajian ini memberi kesimpulan bahwa penggunaan basa NaOH dalam pengolahan awal (*pretreatment*) serat TKS mampu menghilangkan lignin secara signifikan. Selain itu, efek ledakan (*explosion*) dapat mengurai struktur internal serat TKS. Penghilangan lignin dan penguraian struktur internal ini meningkatkan akses air dan enzim sehingga memberi kemudahan pada proses hidrolisis.

Implementasi proses ALFEX diawali dengan perancangan reaktor berkapasitas 500 mL tanpa pengaduk dan mampu beroperasi hingga tekanan 10 bar (Gambar 11). Reaktor terbuat dari bahan stainless-steel 304 dan pembuatannya dikerjakan oleh bengkel lokal (Bandung). Reaktor dipasang pada sebuah rangka besi kemudian dirangkai dengan kelengkapan heater pemanas lilit dan pasokan steam dari boiler. Pada saluran keluaran reaktor di bagian bawah, sebuah kerangan bola ukuran 1 inci (*ball-valve*) dipasang untuk mengeluarkan isi reaktor secara mendadak. Isi reaktor disalurkan ke dalam sebuah bejana dengan volume yang cukup besar (60 liter) agar dapat mengakomodasi perubahan volume akibat penurunan tekanan.



Gambar 11 Reaktor ALFEX (alkali fiber explosion) berukuran 500 mL dari stainless steel 304 yang dapat beroperasi hingga 10 bar.

Rangkaian alat ini telah digunakan untuk mengolah serat TKS. Serangkaian percobaan telah dilaksanakan untuk mendapatkan kondisi operasi terbaik untuk menghasilkan serat TKS olahan yang mudah diolah lebih lanjut pada proses hidrolisis. Sebagai contoh, Gambar 12 memamerkan perubahan serat TKS sebelum diolah dan setelah diolah dengan menggunakan larutan NaOH 1 M menggunakan rangkaian alat ini pada kondisi tekanan 5 bar selama 30 menit. Serat hasil olahan menjadi lebih lembut (seperti pulp) dengan warna yang lebih pucat (akibat hilangnya sebagian besar lignin). Serat ini kemudian digunakan sebagai bahan baku proses hidrolisis enzimatik.

Beberapa masalah muncul pada pengoperasian alat ini antara lain ketidakseragaman produk akibat pemanasan yang tidak merata. Pada gambar 11 terlihat bahwa panas dipasok hanya melalui pemanas lilit di dinding reaktor. Selain itu, reaktor tidak dilengkapi pengaduk karena pemasangan pengaduk relatif sulit pada reaktor dengan ukuran yang relatif kecil.



Gambar 12 Serat TKS sebelum (kiri) dan setelah (kanan) diolah menggunakan larutan NaOH 1 M di dalam reaktor ALFEX (*alkali fiber explosion*) pada kondisi tekanan 5 bar selama 30 menit.

4.2.3 Implementasi Skala Bangku

Pengalaman dalam membuat reaktor *pretreatment* skala laboratorium membuahakan keberanian untuk merancang dan membuat reaktor dengan skala yang lebih besar. Penambahan pengaduk merupakan sebuah isu penting yang diperhatikan saat itu. Reaktor skala 1000 mL dibuat dengan 3 jenis pengaduk (*spiral-anchor*, *double helix* dan *3-stage single blade*) yang dapat dilepas-pasang. Selain itu, kerangan untuk melepas tekanan di bawah reaktor dilengkapi dengan penggerak hidrolik agar dapat membuka dan menutup

secara otomatis. Lignoselulosa terolah dilepas ke dalam sebuah tangki berkapasitas 100 liter pada posisi tepat di bawah reaktor *pretreatment*. Tinggi rangkaian alat (reaktor dan tangki penampung) mencapai lebih dari 2 meter, sehingga sebuah platform kerja dibangun untuk menyangga rangkaian alat dan sebagai fasilitas kerja bagi operator yang mengoperasikan alat. Gambar skematik rancangan alat dan foto alat yang sudah beroperasi disajikan pada gambar 13.

Reaktor *pretreatment* ini sudah digunakan untuk mengolah TKS dengan hasil TKS olahan yang lebih baik dibandingkan dengan hasil TKS olahan yang diperoleh dari reaktor laboratorium. Isu ketidak-seragaman pemanasan sudah dapat diatasi pada reaktor ini. Walaupun demikian, beberapa kendala lain yang tidak terjadi di skala laboratorium muncul di reaktor skala bangku ini. Kendala pertama adalah hilang panas dari tutup reaktor. Insulasi reaktor hanya dipasang pada bagian tabung dan konus saja, namun insulasi sulit dipasang pada tutup reaktor karena bentuknya yang rata-mendatar dan juga terdapat beberapa nosel untuk pengaduk, sensor temperatur dan lubang umpan (lihat Gambar 13 inset). Hilang panas yang keluar melalui tutup cukup signifikan dan mengakibatkan temperatur operasi proses *pretreatment* sulit dicapai. Untuk mengatasi hal ini, pemanas listrik lilit tambahan dipasang di bagian tabung dan konus reaktor agar panas tambahan bisa dipasok melalui pemanas ini.



Gambar 13 Rancangan reaktor *pretreatment* skala 1000 mL berpengaduk beserta tangki penampung (*expander tank*) (kiri); foto rangkaian peralatan yang sudah beroperasi (kanan), dan reaktor *pretreatment* (inset).

Kendala kedua adalah disain lubang saluran keluaran udara (*venting*) di tangki penampung yang kurang tepat. Seperti pada umumnya, saluran keluaran udara dipasang di atas tangki dan mengarah ke atas. Pada saat isi reaktor dilepas dari tekanan tinggi (sekitar 10 bar) ke tekanan atmosferik, hampir semua air yang ada di dalam reaktor menguap mendadak menghasilkan volume uap yang besar. Uap ini mendorong udara di dalam tangki dan bersama-sama keluar melalui saluran keluaran udara. Dikarenakan saluran keluaran udara ini memiliki ukuran diameter yang relatif kecil dibandingkan dengan diameter tangki, maka kecepatan fluida yang melewati saluran ini sangat cepat. Serat TKS yang tersembur ke dalam tangki penampung, sebagian terbawa oleh aliran fluida keluar melalui saluran keluaran udara dan bisa mencapai ketinggian lebih dari 6 meter (batas langit-langit *open-lab*). Masalah ini kemudian diatasi dengan mengarahkan saluran keluaran udara ke bawah menuju ke sebuah penampung tambahan.

Dari pengalaman tersebut dapat disimpulkan bahwa insulasi panas pada reaktor *pretreatment* merupakan hal yang sangat penting untuk menjaga kinerja reaktor tetap optimum. Hilang panas akibat insulasi yang buruk mengakibatkan kondensasi kukus di dalam reaktor sehingga kondisi operasi sulit tercapai. Kondensasi kukus juga mengakibatkan bertambahnya air dalam larutan NaOH sehingga konsentrasi larutan NaOH turun. Penurunan konsentrasi larutan NaOH dapat mengurangi kelarutan lignin sehingga tujuan proses *pretreatment* yaitu membuka struktur lignoselulosa melalui pelarutan lignin menjadi kurang efektif.

Pelajaran berharga yang diperoleh dari desain dan operasi tangki penampung yang digunakan untuk menampung semburan dari reaktor *pretreatment* adalah bahwa penyaluran semburan harus diatur kembali sehingga pemisahan padatan dan gas/uap dapat terjadi. Hal ini mengarah kepada penggunaan prinsip siklon di mana semburan diarahkan secara sentrifugal di sepanjang dinding tangki sedangkan gas/uap dapat dengan mudah keluar dari bagian tengah tangki. Selain itu, gas/uap yang keluar memerlukan sistem peredam (*silencer*) untuk mengurangi kecepatan alir gas/uap dan suara dentuman pada saat terjadi semburan.

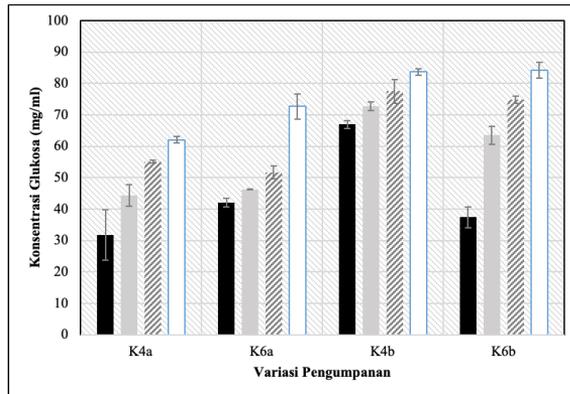
4.2 Proses Hidrolisis Enzimatik

Hidrolisis komponen lignoselulosa, terutama selulosa menjadi monomer glukosa, sudah dipelajari oleh banyak peneliti (Abdi et al., 2000; Aita et al., 2011; Ballesteros et al., 2002; Curreli et al., 2002; El-Zawawy et al., 2011; Guo et al., 2009). Namun, para peneliti ini melakukan hidrolisis enzimatik dengan padatan lignoselulosa tidak lebih dari 10%-berat terhadap keseluruhan campuran reaksi. Jika komponen selulosa yang terkandung di dalam lignoselulosa hanya 30-40% saja, maka jumlah maksimal glukosa yang dapat diperoleh adalah sekitar 3-4%. Jika glukosa ini kemudian difermentasi menjadi bioetanol, maka jumlah etanol yang diperoleh adalah sekitar 1.5-2%-berat. Jumlah bioetanol ini sangat encer sehingga beban pemisahan dan pemurnian bioetanol menjadi lebih berat. Apabila ragi *Saccharomyces cerevisiae* umumnya dapat memfermentasi glukosa menjadi bioetanol dengan rentang 6-10%-berat, maka jumlah glukosa yang dibutuhkan sekitar 12-20%-berat. Dengan demikian, jumlah lignoselulosa yang harus diolah adalah sekitar 35-60% padatan dalam basis kering. Jika 60 gram serat TKS kering dicampurkan dengan 40 gram larutan enzim, maka seluruh cairan terserap ke dalam padatan. Padahal campuran reaksi enzimatik yang baik harus masih mengandung cairan agar mobilitas enzim dapat terjaga sehingga proses hidrolisis berlangsung efektif.

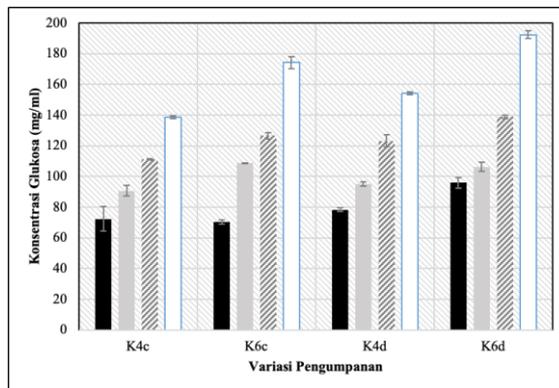
Untuk mengatasi masalah ini, sebuah konsep hidrolisis bertahap diaplikasikan agar campuran hidrolisis enzimatik tetap berisi cairan sehingga mobilitas enzim dapat dipertahankan dengan baik. Pengembangan konsep ini dilaksanakan pada penelitian tesis dari mahasiswa Magister Teknik Kimia (Christyfani Sindhuwati). Percobaan hidrolisis bertahap dilaksanakan melalui empat skenario, yaitu:

- (a) substrat serat TKS, enzim dan larutan buffer dimasukkan ke dalam reaktor secara bertahap masing-masing sebanyak 20% dari total padatan yang diolah pada selang setiap 4 jam hingga 16 jam reaksi;
- (b) substrat serat TKS, enzim dan larutan buffer dimasukkan ke dalam reaktor secara bertahap dengan perbandingan menurun 50%, 25%, 12,5%, 6,25% dan 6,25% dari total padatan pada selang setiap 4 jam hingga 16 jam reaksi;
- (c) substrat serat TKS dimasukkan secara bertahap sebanyak 20% setiap 4 jam hingga 16 jam reaksi, namun enzim dan larutan buffer ditambahkan di awal (50%) dan di akhir reaksi saja (50%);

(d) substrat serat TKS ditambahkan secara bertahap dengan perbandingan menurun 50%, 25%, 12,5%, 6,25% dan 6,25% dari total kebutuhan pada selang setiap 4 jam hingga 16 jam reaksi, sedangkan enzim dan larutan buffer ditambahkan di awal (50%) dan di akhir reaksi saja (50%).



Gambar 14 Konsentrasi glukosa hasil hidrolisis berdasarkan pengumpanan bertahap dengan jumlah umpan, enzim dan larutan buffer seragam (a) dan menurun (b) pada selang 4 jam (K4) dan 6 jam (K6).



Gambar 15 Konsentrasi glukosa hasil hidrolisis berdasarkan pengumpanan bertahap dengan jumlah umpan seragam (c) dan menurun (d) dan penambahan enzim dan larutan buffer di awal (50%) dan akhir (50%) pada selang 4 jam (K4) dan 6 jam (K6).

Serat TKS setelah mendapat perlakuan awal (*pretreatment*) memiliki komposisi 40,5% selulosa, 5,8% hemiselulosa dan 18,3% lignin. Hidrolisis dilaksanakan menggunakan enzim Cellic CTec2 dengan dosis 20 FPU/gram selulosa pada pH 5 dan temperatur 48 °C. Percobaan yang dilaksanakan selama 16 jam dengan selang waktu sampling 4 jam (K4). Percobaan serupa juga dilakukan selama 24 jam dengan selang waktu sampling 6 jam (K6).

Hasil hidrolisis dari skenario (a) dan (b) yang dilaksanakan dengan selang waktu 4 jam dan 6 jam disajikan dalam Gambar 14. Dari hasil percobaan ini dapat dipahami bahwa selang waktu yang lebih lama memberi kesempatan bagi enzim untuk menghidrolisis serat selulosa lebih banyak sehingga glukosa yang dihasilkan juga lebih banyak. Pengumpanan menurun menghasilkan jumlah gula lebih banyak dibandingkan dengan pengumpanan seragam. Hal ini mungkin disebabkan karena jumlah enzim awal yang lebih banyak (50%) ditambahkan pada skenario penambahan menurun dibandingkan dengan skenario penambahan seragam. Jumlah enzim yang lebih banyak dapat meningkatkan laju reaksi, sehingga konsentrasi glukosa yang dicapai di akhir proses dapat lebih tinggi.



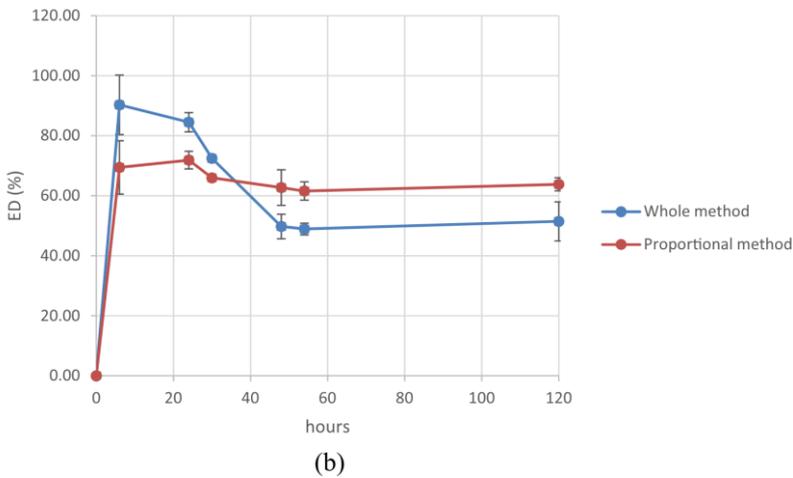
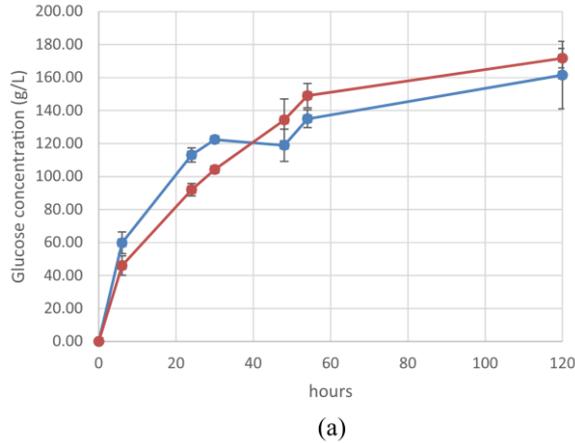
Gambar 16 Kondisi campuran serat TKS dan enzim sebelum (kiri) dan sesudah (kanan) reaksi hidrolisis berlangsung.

Penambahan enzim yang besar di awal reaksi memberi efek yang sangat signifikan terhadap kinerja hidrolisis. Hasil hidrolisis dari skenario (c) dan (d) menunjukkan hasil yang jauh lebih banyak dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dari skenario (a) dan (b) (Gambar 15). Demikian halnya penambahan substrat dengan jumlah menurun (d) menghasilkan glukosa yang lebih banyak dibandingkan dengan penambahan substrat dengan jumlah seragam (c). Sama halnya dengan percobaan dengan skenario (a) dan (b), selang waktu yang lebih lama (6 jam) menghasilkan glukosa yang lebih banyak. Reaksi hidrolisis enzimatik merupakan reaksi yang memiliki kecepatan relatif lambat waktu reaksi sangat menentukan. Penambahan enzim maupun substrat yang signifikan di awal memberi kesempatan lebih lama bagi enzim menghidrolisis substrat sehingga glukosa yang dihasilkan lebih banyak.

Kesimpulan yang dapat diambil dari studi ini adalah bahwa jumlah enzim dan substrat (serat TKS) harus dimaksimumkan di awal reaksi hidrolisis agar reaksi dapat berjalan berlangsung lebih cepat dan menghasilkan konversi yang lebih besar. Pada kasus di mana jumlah substrat berupa serat TKS cukup banyak untuk mengejar konsentrasi glukosa yang diinginkan, strategi penambahan substrat secara bertahap dapat dilakukan agar reaksi hidrolisis dapat berlangsung dengan baik. Sebagai contoh, apabila 60 gram serat TKS akan dihidrolisis menggunakan 40 gram larutan enzim, maka pengumpanan serat TKS sekaligus ke dalam larutan enzim mengakibatkan semua cairan terserap ke dalam serat TKS sehingga mobilitas enzim terhambat. Karena itu, pengumpanan serat TKS harus dilakukan secara bertahap untuk menjaga adanya cairan di dalam campuran reaksi hidrolisis. Pada awal reaksi hidrolisis, campuran reaksi harus memiliki cairan yang cukup agar enzim dapat termobilisasi dengan baik (Gambar 16). Setelah reaksi hidrolisis berlangsung, serat selulosa (padat) terkonversi menjadi glukosa yang larut ke dalam larutan (cairan). Serat selulosa dapat ditambahkan lagi ke dalam cairan tersebut sehingga reaksi hidrolisis dapat berlangsung terus. Moda operasi ini sering disebut *semi-batch* atau *fed-batch* di mana umpan ditambahkan perlahan-lahan untuk menjaga reaksi tetap dalam keadaan optimum. Moda operasi ini biasa digunakan untuk mendapatkan konsentrasi produk yang tinggi. Walaupun demikian, reaksi hidrolisis dapat melambat pada konsentrasi produk yang tinggi akibat inhibisi produk terhadap enzim.

Metode ini kemudian digunakan kembali untuk mengolah tandan kosong sawit (Sugiharto et al., 2016). Perlakuan awal dilaksanakan menggunakan larutan NaOH 1.5 M selama 0.5 jam pada temperatur 180°C diikuti dengan *steam explosion*. Enzim Cellic CTec2 (Novozymes) digunakan untuk menghidrolisis TKS terolah dengan takaran 70 FPU/gram padatan kering. Hidrolisis dilaksanakan dalam botol Schott-Duran ukuran 100 mL dengan volume kerja 30 mL pada temperatur 50 °C dan pengadukan 150 rpm. Hidrolisis dilakukan selama 54 jam. Penambahan enzim dilaksanakan dengan dua cara yaitu: keseluruhan di awal reaksi; dan secara bertahap sesuai dengan penambahan substrat. Hasil percobaan menunjukkan bahwa konsentrasi yang tinggi di awal proses membuat reaksi hidrolisis berlangsung lebih cepat (Gambar 17). Hal ini sesuai dengan fenomena yang terjadi pada percobaan sebelumnya. Namun kemampuan enzim ini yang dinyatakan sebagai *enzyme digestibility* (%ED) menurun setelah mencapai 20 jam reaksi. Hal ini tidak

teramati di percobaan sebelumnya karena waktu yang terbatas (16 dan 24 jam). Pada percobaan ini, penambahan enzim secara berkala justru dapat mempertahankan ED sehingga secara total kemampuan enzim untuk menghidrolisis dapat dipertahankan pada tingkat yang lebih tinggi.



Gambar 17 Perbandingan strategi pengumpanan pada: (a) kosentrasi glukosa; (b) *enzyme digestibility* (ED).

Kedua penelitian ini menghasilkan konsentrasi glukosa yang cukup tinggi yaitu sekitar 180 gr/liter (sekitar 18%-berat). Kedua hasil ini menjadi perhatian ketika proses hidrolisis dilakukan pada skala yang lebih besar - dengan sistem pengadukan dan jumlah enzim yang berbeda. Metode penambahan substrat dan/atau enzim secara bertahap merupakan sebuah terobosan yang signifikan dalam pengembangan proses hidrolisis enzimatik bahan lignoselulosa. Karena itu, hak kekayaan intelektual tentang proses perlakuan awal TKS dan

strategi pengumpulan *fed-batch* pada proses hidrolisis enzimatis sudah diajukan. Beberapa paten HAKI ini juga sudah diperoleh (Tabel 4).

Tabel 4 Daftar paten terkait *pretreatment* dan hidrolisis tandan kosong sawit.

Judul Paten	Nomor	Tahun
Proses perlakuan awal tandan kosong kelapa sawit dengan diikuti hidrolisis enzimatis secara <i>fed-batch</i> untuk produksi glukosa	IDP000089933 (Indonesia)	2023
<i>Pretreatment operation condition and substrate feeding strategies in fed-batch enzymatic hydrolysis for glucose production from oil palm empty fruit bunch</i>	P12020005896; MY-196195-A (Malaysia)	2023

4.3 Sistem Pengadukan

Pada proses *pretreatment* maupun hidrolisis enzimatis, serat TKS diaduk dalam keadaan basah dengan konsistensi yang tinggi (kandungan padatan yang tinggi dalam campuran). Serat TKS yang basah memiliki sifat kohesi dan adhesi yang lebih tinggi dibandingkan serat TKS dalam keadaan kering. Dengan kata lain, serat TKS sangat mudah menempel satu sama lain dan juga menempel di dinding atau pengaduk. Hal ini tentu saja membuat pengadukan menjadi tidak efektif. Padahal pengadukan merupakan hal penting dalam proses *pretreatment* maupun hidrolisis, terutama untuk meratakan panas, bahan kimia maupun enzim ke seluruh serat TKS yang diolah. Agregasi serat TKS juga dapat menimbulkan kendala-kendala lain seperti peningkatan konsumsi energi pengadukan. Agregasi serat yang cukup besar dapat mengakibatkan gesekan yang besar sehingga konsumsi energi pengadukan meningkat untuk melawan gesekan tersebut. Gesekan yang berlebihan dapat menimbulkan panas dan menaikkan temperatur. Hal ini tidak diharapkan terutama pada proses hidrolisis enzimatis di mana enzim memiliki temperatur kerja tertentu. Kenaikan temperatur yang berlebihan dapat mengakibatkan enzim terdeaktivasi bahkan dapat terdenaturasi.

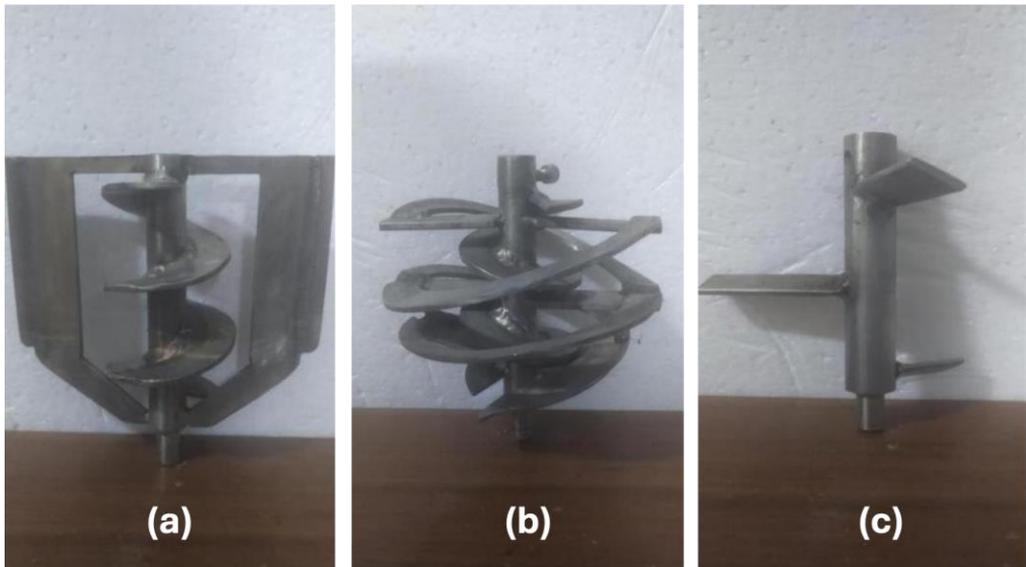
Umumnya simulasi dan perancangan pengadukan untuk serat basah dapat dilakukan menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics* (CFD) seperti *ANSYS Fluent*, *COMSOL Multiphysics* dan lainnya. Perancangan pengaduk menggunakan perangkat lunak dapat lebih terstruktur dan efisien karena perangkat lunak melakukan analisis secara akurat serta memprediksi kinerja pengaduk sebelum diimplementasikan secara nyata. Walaupun demikian, ada beberapa hal yang perlu dipenuhi sebelum perangkat lunak CFD dapat digunakan antara lain:

1. **Model fisik serat.** Simulasi serat basah memerlukan model fisik yang merepresentasikan karakteristik serat seperti panjang, kelenturan, sifat gesekan baik antar serat maupun dengan dinding/alat pengaduk.
2. **Perhitungan interaksi serat-fluida.** Interaksi serat dengan fluida dan bagaimana serat memengaruhi aliran fluida perlu dimodelkan dengan tepat. Hal ini tentu saja meningkatkan kompleksitas model simulasi.
3. **Model viskositas non-Newtonian.** Campuran serat basah seringkali memiliki sifat non-Newtonian di mana viskositas fluida berubah seiring perubahan gaya yang bekerja.

Prediksi sifat-sifat fisik serat basah tersebut memerlukan sejumlah percobaan menggunakan berbagai instrumen alat ukur untuk mendapatkan data. Data yang dihasilkan kemudian digunakan untuk membangun model sifat-sifat fisik serat basah.

Perjalanan menuju simulasi dan perancangan sistem pengadukan serat basah menggunakan perangkat lunak CFD cukup makan waktu, tenaga dan biaya karena data-data awal belum tersedia. Karena itu, perancangan sistem pengadukan serat TKS basah dilaksanakan melalui pendekatan empiris dan *trial-and-error*. Pendekatan ini diharapkan dapat memberi gambaran umum tentang karakteristik pengadukan serat basah sehingga langkah-langkah praktis rekayasa bisa digunakan dalam upaya membangun sistem pengadukan serat TKS basah.

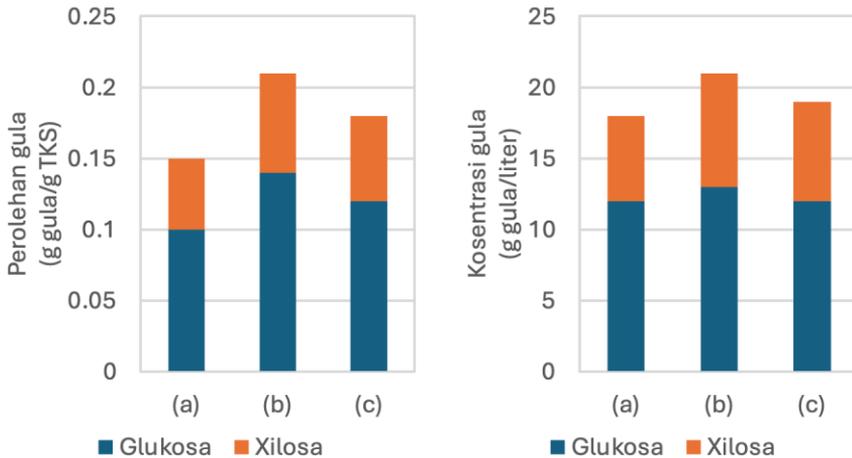
Kinerja pengadukan di dalam reaktor *pretreatment* dilaksanakan dengan menggunakan tiga jenis pengaduk yaitu: (a) *anchor-screw*; (b) *helical-ribbon*; dan (c) *2-stage single blade* (Gambar 18). Prestasi kinerja pengadukan diukur melalui glukosa yang terbentuk setelah serat TKS dihidrolisis oleh enzim secara terpisah. Perolehan dan konsentrasi glukosa yang menunjukkan kinerja pengadukan reaktor *pretreatment* disajikan pada gambar 19. Pengaduk jenis *helical-ribbon* menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan dua jenis pengaduk lainnya. Perolehan gula total sebesar 0.21 g-gula/g-TKS dihasilkan oleh reaktor *pretreatment* dengan menggunakan pengaduk tipe *helical-ribbon*. Pengaduk jenis ini juga menghasilkan konsentrasi gula total yang lebih tinggi (21 g-gula/liter).



Gambar 18 Reaktor *pretreatment* dengan pengaduk yang dapat dibongkar-pasang: (a) *spiral-anchor*; (b) *double helix*; dan (c) *3-stage single blade*.

Berdasarkan pengamatan visual, pengaduk jenis anchor memiliki kinerja yang buruk untuk aplikasi pengadukan serat TKS basah. Serat bertumpuk di permukaan pengaduk *anchor* dan terbawa berputar tanpa ada pengadukan arah tegak (*axial*) maupun ke dalam (*radial*). Lain halnya dengan pengaduk *3-stage single blade* yang mengaduk pada posisi sesuai ketinggian blade. Serat TKS basah cenderung diam di sela-sela blade dan tidak teraduk. Pengaduk *double helix* memiliki mekanisme angkat di bagian dinding reaktor dan mekanisme tekan di bagian tengah sehingga serat kadang naik ke atas tetapi juga kadang di dorong ke bawah. Dengan demikian mekanisme pengadukan dari pengaduk *double-helix* ini lebih baik dari mekanisme dua pengaduk yang lainnya.

Kinerja pengadukan di dalam reaktor hidrolisis yang umumnya berbentuk silinder juga dipelajari. Beberapa jenis pengaduk yang biasa digunakan untuk pengadukan campuran padat cair dibuat dan diuji. Jenis pengaduk tersebut antara lain adalah: (a) *anchor-screw*; (b) *helical-ribbon* parsial; (c) *Modified 3-stage blade*; dan (d) *single helical ribbon* (Gambar 20). Reaktor hidrolisis yang digunakan terbuat dari kaca dan memiliki diameter 10 cm dan tinggi 20 cm. Kecepatan putar motor pengaduk dapat diatur sehingga kinerja pengaduk dapat diamati pada kecepatan putar rendah, sedang, dan tinggi.

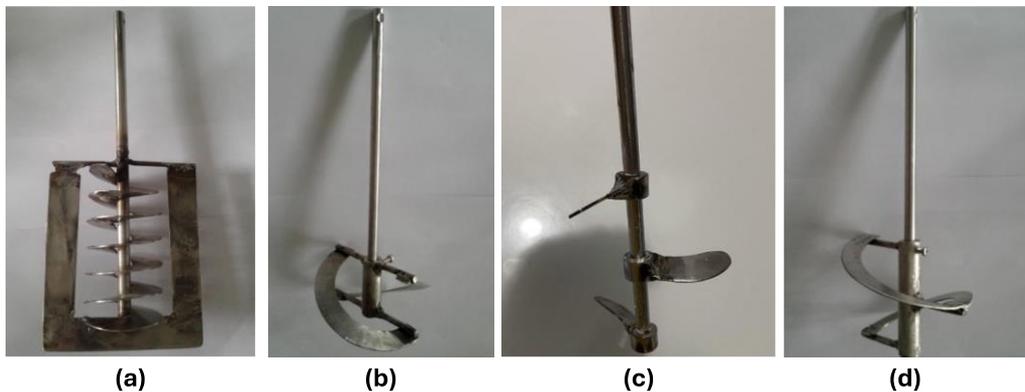


Gambar 19 Kinerja pengaduk reaktor *pretreatment*: (a) spiral-anchor; (b) helical-ribbon; dan (c) 3-stage single blade.

Kinerja pengaduk *anchor-screw* di reaktor hidrolisis mirip dengan kinerja pengaduk sejenis di reaktor *pretreatment* di mana padatan cenderung menumpuk di pengaduk *anchor* dan berputar bersama. Bagian *screw* berputar bersamaan dengan *anchor* sehingga tidak memberikan efek angkat maupun tekan. Hal ini terjadi baik pada kecepatan putar rendah, sedang maupun tinggi. Dapat disimpulkan bahwa pengaduk jenis ini tidak cocok digunakan untuk padatan serat seperti TKS.

Uji kinerja pengaduk *helical-ribbon* parsial dilakukan pada putaran rendah, sedang, dan tinggi. Pada putaran rendah, serat TKS tidak mengalami pengadukan dan cenderung berputar bersama dengan pengaduk. Pada putaran sedang dan tinggi, sebagian serat terlempar dari pengaduk sehingga terjadi pengadukan. Uji kinerja ini juga dilaksanakan pada perbandingan padatan: cairan (S/L) yang berbeda. Hasil uji menunjukkan bahwa jumlah air yang lebih banyak pengadukan menjadi semakin baik.

Pengaduk jenis *Modified 3-stage blade* memiliki kinerja yang baik pada putaran rendah, sedang hingga tinggi. Namun, pengaduk ini tidak dapat bekerja dengan baik pada S/L yang tinggi sekalipun pada putaran yang rendah. Hal ini dapat dipahami karena pengaduk tipe ini hanya memiliki bilah pengaduk pada ketinggian tertentu saja. Walaupun bilah tersebut memiliki sudut tertentu, namun hal ini tidak dapat mendorong serat dari bilah satu ke bilah lain sehingga serat cenderung diam di sela-sela bilah-bilah.



Gambar 20 Jenis pengaduk yang diuji untuk reaktor hidrolisis: (a) *anchor-screw*; (b) *helical-ribbon* parsial; (c) *Modified 3-stage blade*; dan (d) *single helical ribbon*.

Pengaduk *single helical-ribbon* dapat mengaduk dengan baik pada S/L tinggi (campuran encer). Tipe pengaduk ini membutuhkan energi putar awal yang cukup tinggi untuk mengangkat padatan yang terendapkan. Ketika padatan telah terangkat, maka pengadukan berlangsung lancar dengan energi yang lebih rendah. Kebutuhan energi putar awal sebanding dengan S/L campuran. Selanjutnya, pengaduk tipe ini digunakan untuk melaksanakan reaksi hidrolisis. Gula maksimum dihasilkan setelah waktu 40 jam dengan tingkat perolehan 0.17 g-glukosa/g-TKS terolah.

Studi tentang perancangan pengaduk memberi gambaran bahwa ilmu teknik kimia tidak hanya diperoleh sebatas teori di buku-buku saja, melainkan sebagian lain bisa diperoleh dari pengalaman secara empirik. Banyak hal baru dan tersembunyi ditemukan saat mencari solusi dari masalah yang dihadapi. Hal-hal baru ini menjadi kekayaan pengetahuan dan pengalaman yang baik dan dapat dibagikan kepada khalayak.

4.4 Pengembangan Produksi Enzim Selulase

Enzim selulase merupakan komponen penting di ekosistem industri berbasis lignoselulosa. Enzim selulase dibutuhkan untuk menghidrolisis selulosa menjadi glukosa sebelum diolah lebih lanjut menjadi produk-produk turunan yang strategis dan bernilai jual tinggi. Proses hidrolisis menggunakan enzim berlangsung secara spesifik, tidak menghasilkan produk samping yang berbahaya, konversi yang tinggi (>90%), dan kondisi operasi yang ringan. Sejalan dengan berkembangnya industri berbahan baku lignoselulosa,

kebutuhan enzim selulase juga dipastikan meningkat pesat. Hingga saat ini, enzim selulase masih diimpor dari negara-negara produsennya. Beberapa produsen enzim terkemuka di dunia antara lain adalah Novozyme (Denmark), DuPont (Amerika), DSM (Belanda), AB Enzymes (Jerman) dan Advance Enzyme Technologies (India).

Harga enzim selulase di dunia masih tergolong tinggi. Hal ini disebabkan oleh mahalannya biaya riset dan produksi, kebutuhan pasar yang besar, dan mahalannya ongkos pemurnian enzim. Sebagai contoh, walaupun penggunaan enzim selulase relatif sedikit, namun biaya penyediaannya dapat mencapai 40% dari total biaya produksi bioetanol (Behera and Ray, 2016). Berdasarkan fakta ini, kemampuan memproduksi enzim secara mandiri sangat penting dan mendesak demi pengembangan industri berbasis lignoselulosa di Indonesia.

Penelitian tentang produksi enzim selulase di Teknik Kimia ITB dimulai pada tahun 2014. Produksi enzim ini dilaksanakan dengan metode fermentasi fasa padat (*solid-state fermentaton* - SSF) menggunakan mikroorganisme tunggal *Trichoderma viridae* atau *Trichoderma reesei* dengan bahan baku jerami padi dan kertas saring (sebagai pembanding). Enzim yang dihasilkan mencapai aktivitas sekitar 0.48-0.81 FPU/ml. Penelitian produksi enzim selulase dilanjutkan pada tahun 2018 dengan menggunakan serat TKS sebagai bahan baku. Metode fermentasi fasa padat menggunakan mikroorganisme *Trichoderma viridae* dan *Trichoderma reesei* digunakan untuk memproduksi enzim selulase. Enzim yang dihasilkan memiliki aktivitas 0.79 FPU/g-substrat kering (Wonoputri et al., 2018).

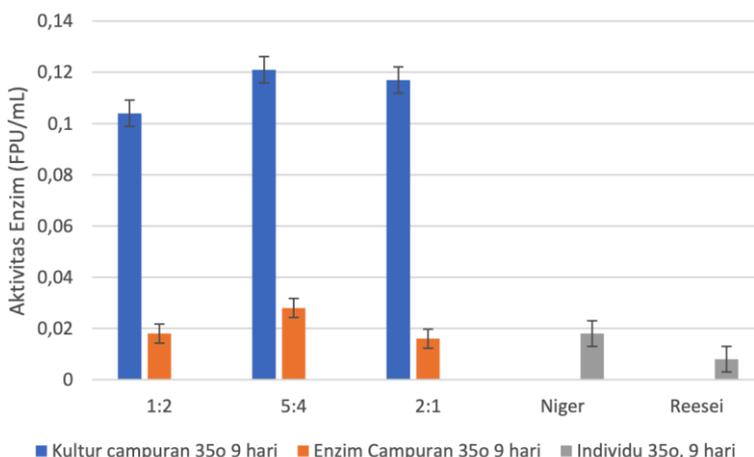
Saat ini, sejumlah besar peneliti dunia sudah melakukan berbagai penelitian dan pengembangan produksi enzim selulase (Idris et al., 2017; Mendes et al., 2017; Walker and Wilson, 1991). Berbagai mikroorganisme penghasil enzim selulase telah digunakan antara lain *Trichoderma* sp., *Aspergillus* sp., dan *Rhizopus* sp. (Behera and Ray, 2016; Ezeilo et al., 2019; Gusakov et al., 2007; Lee et al., 2011). Namun, masing-masing mikroorganisme memiliki karakteristik produk enzim yang spesifik. Sebagai contoh, *Trichoderma* sp sangat umum digunakan dalam produksi enzim selulase namun tidak menghasilkan enzim β -glucosidase yang seimbang sehingga menghambat pembentukan glukosa (Gusakov et al., 2007). Di sisi lain, *Penicillium* sp. dan *Aspergillus* sp. menghasilkan enzim β -glucosidase

yang lebih banyak (Gusakov et al., 2007; Lee et al., 2011). Berdasarkan fakta ini, beberapa peneliti mencoba untuk menggabungkan enzim selulase dari berbagai mikroorganisme (*enzyme cocktail*) dengan harapan agar kelemahan enzim yang dihasilkan oleh salah satu mikroorganisme dapat ditutupi oleh keunggulan dari mikroorganisme lainnya sehingga enzim yang diperoleh memiliki proporsi enzim individual yang seimbang (Intasit et al., 2021).

Penelitian tentang produksi enzim selulase dari dua mikroorganisme dilaksanakan tahun 2021. Mikroorganisme kerja yang digunakan adalah *Trichoderma reesei* dan *Aspergillus niger*. Substrat yang digunakan adalah TKS yang telah diolah terlebih dahulu (*pretreated*). Ada tiga skenario percobaan yang dilaksanakan yaitu:

1. Produksi enzim selulase dari masing-masing mikroorganisme. Enzim yang dihasilkan kemudian diuji aktivitasnya.
2. Enzim selulase yang dihasilkan dari masing-masing mikroorganisme dicampur dengan perbandingan *T. reesei*:*A. niger* sebesar 1:2; 5:4 dan 2:1. Enzim campuran ini kemudian diuji aktivitasnya.
3. Produksi enzim selulase menggunakan kultur *T. reesei*:*A. niger* dengan perbandingan sebesar 1:2; 5:4 dan 2:1. Enzim yang diperoleh dari fermentasi kultur campuran kemudian diuji aktivitasnya.

Hasil uji aktivitas enzim selulase dari berbagai skenario percobaan disajikan pada gambar 21.



Gambar 21 Aktivitas enzim selulase yang dihasilkan oleh *T. reesei* dan *A. niger*: masing-masing individu, enzim campuran dan kultur campuran.

Hasil percobaan menunjukkan bahwa enzim dari masing-masing mikroorganisme tidak dapat memiliki aktivitas yang tinggi. Hal ini disebabkan oleh regulasi alami yang dimiliki enzim sehingga enzim tidak menghasilkan glukosa secara berlebihan namun hanya cukup untuk kebutuhan sel saja. Ketika kedua enzim dari masing-masing mikroorganisme dicampurkan, aktivitas enzim campuran sedikit meningkat dibandingkan aktivitas enzim individunya. Hal ini menunjukkan adanya kerja yang sinergis dari enzim individu yang terkandung dalam enzim dari masing-masing mikroorganisme. Peningkatan aktivitas enzim yang cukup besar ada pada enzim yang dihasilkan dari produksi enzim menggunakan dua mikroorganisme sekaligus. Hal ini menunjukkan adanya interaksi antarmikroorganisme yang mengakibatkan terbentuknya enzim kompleks yang memiliki aktivitas tinggi.

Fermentasi fasa padat (*solid-state fermentation* - SSF) sering digunakan dalam produksi enzim karena memiliki beberapa keunggulan antara lain:

1. cocok digunakan untuk produksi enzim menggunakan mikroorganisme jamur berfilamen seperti *Aspergillus* sp., *Trichoderma* sp. dan *Rhizopus* sp. karena mikroorganisme-mikroorganisme ini dapat tumbuh baik pada medium padat;
2. dapat menghasilkan konsentrasi enzim yang lebih tinggi dan lebih stabil;
3. konsumsi energi yang rendah karena tidak memerlukan pengadukan yang intensif.

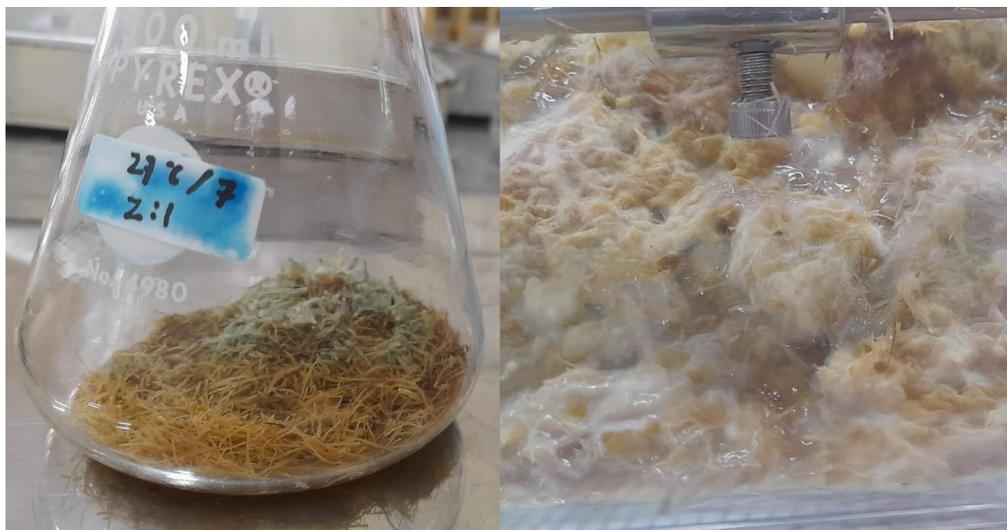
Walaupun demikian, beberapa kendala yang dihadapi oleh fermentasi fasa padat antara lain:

1. pengendalian kondisi operasi yang sulit, terutama kadar air pada substrat, kelembaban udara sekitar, dan distribusi nutrisi;
2. distribusi udara pembawa oksigen yang tidak merata, dan distribusi panas yang tidak merata.

Akibat kendala operasi ini, pertumbuhan mikroorganisme jamur terhambat (gambar 22a), dan tentunya memengaruhi produksi enzim selulase yang diinginkan.

Untuk meningkatkan laju pertumbuhan mikroorganisme jamur - yang juga berdampak pada produktivitas enzim selulase - fermentasi semi-padat digunakan untuk produksi enzim selulase. Fermentasi semi-padat adalah fermentasi yang tidak melibatkan cairan curah seperti fermentasi terendam (*submerge fermentation*). Jumlah cairan yang banyak dapat menyulitkan

pemisahan produk enzim dari larutan fermentasi (*fermentation broth*). Namun, sejumlah cairan dipertahankan ada di dalam reaktor untuk menjaga kadar air, kelembaban udara sekitar dan distribusi nutrisi yang lebih baik. Melalui fermentasi semi-padat, pertumbuhan mikroorganisme jamur dapat lebih cepat dan lebih banyak sehingga enzim yang dihasilkan juga dapat lebih banyak (Gambar 22b).



(a)

(b)

Gambar 22 Fermentasi fasa padat (a); dan fermentasi semi-padat (b)

Penelitian tentang produksi enzim selulase ini sedang dan masih terus dilaksanakan dengan target produksi enzim selulase curah yang dapat digunakan untuk menghidrolisis serat TKS dengan efektif dan efisien. Berbagai hal masih harus diselesaikan antara lain: peningkatan aktivitas enzim; kestabilan enzim; ekstraksi enzim yang efisien; dan pemekatan enzim. Semoga penelitian ini dapat memberi kontribusi yang signifikan bagi industri berbasis lignoselulosa di Indonesia.

4.5 Pabrik Pilot Biorefinery

Studi tentang optimisasi teknologi proses pengolahan tandan kosong sawit sebagai bahan lignoselulosa terpilih telah dilaksanakan oleh ITB dan PT ReKayasa Industri sejak tahun 2013 sampai dengan 2016. Studi ini menghasilkan berbagai capaian antara lain: pemahaman tentang proses

pretreatment; hidrolisis enzimatik dan fermentasi etanol; beberapa paten (tabel 4); dan publikasi (Mariyana et al., 2021; Sugiharto et al., 2016). Pada tahun 2018, PT Rekayasa Industri melakukan uji implementasi hasil penelitian ini pada Pabrik Pilot milik LIPI (BRIN). Hasil uji menunjukkan bahwa kinerja proses turun hingga 50%. Setelah diteliti lebih mendalam, reaktor hidrolisis enzimatik yang digunakan ternyata hanya mampu bekerja dengan beban padatan 12% saja. Seperti yang telah dibahas sebelumnya, jumlah padatan yang harus dipasok jauh lebih besar dari batas tersebut. Karena itu, ITB dan PT Rekayasa Industri melakukan penelitian lebih lanjut tentang perancangan reaktor *pretreatment* dan hidrolisis enzimatik. Selain itu, studi tentang fraksionasi komponen-komponen lignoselulosa yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin juga dilaksanakan.



Gambar 23 Peresmian Pabrik Pilot Pengolahan Tandan Kosong Kelapa Sawit oleh Menteri Perindustrian RI dan penanda-tanganan Perjanjian Kerjasama antara ITB, PT Rekayasa Industri dan Balai Besar Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri Agro (BBSPJIA). Dari kiri ke kanan: Bapak Agus Gumiwang Kartasasmita (Menteri Perindustrian RI), Bapak Ir. Edi Sutopo, M.Si (Kepala BBSPJIA), Ibu Ir. Triyani Utaminingsih (Dirut PT Rekayasa Industri), Prof. Brian Yulianto (Dekan FTI-ITB) dan Bapak Andi Rizaldi, S.T.,M.M. (Kepala Badan Standardisasi dan Kebijakan Jasa Industri)

Implementasi dari studi-studi ini tertuang pada perancangan dan pembangunan pabrik pilot fraksionasi lignoselulosa di Cikaret, Bogor. Pabrik ini dibangun atas kerja sama ITB - PT Rekayasa Industri - Balai Besar Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri Agro - Kementerian Perindustrian RI. Pabrik yang dibangun dapat bekerja dengan beban padatan hingga 20%.

Pabrik pilot ini telah diresmikan pengoperasiannya oleh Menteri Perindustrian Agus Gumiwang Kartasasmita pada tanggal 8 Agustus 2024 (Gambar 23).



Gambar 24 Pabrik Pilot Pengolahan TKS: (a) reaktor *pretreatment*; (b) bagian atas dari reaktor *pretreatment*; (c) siklon untuk menangkap semburan TKS olahan dari reaktor *pretreatment*; (d) reaktor hidrolisis enzimatis.

Berbagai hasil penelitian sebelumnya terwujud dalam rancangan peralatan di pabrik pilot ini. Sebagai contoh, studi pengadukan di dalam reaktor *pretreatment* merupakan hasil pengembangan dari kajian yang telah dilakukan di laboratorium ITB. Demikian halnya dengan rancangan siklon yang digunakan untuk menangkap padatan yang tersembur dari reaktor *pretreatment* diilhami dari pengalaman saat pengoperasian reaktor *pretreatment* skala bangku di ITB.

Pabrik pilot ini merupakan buah dari perjalanan penelitian dan kerja sama yang panjang antara ITB dan PT Rekayasa Industri bersama Balai Besar Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri Agro. Namun, perjalanan ini belum selesai. Optimisasi proses produksi sehingga menghasilkan produk yang diinginkan masih harus dikerjakan. Demikian pula implementasi teknologi ini pada skala komersial masih harus dikembangkan dan diwujudkan. Semoga hasil yang dicapai saat ini menjadi salah satu batu loncatan yang penting dalam mewujudkan industri kimia yang berkelanjutan melalui pemanfaatan lignoselulosa sebagai bahan baku utamanya.

5. PENGEMBANGAN PRODUK

Berbagai produk turunan dapat dihasilkan dari hasil fraksinasi lignoselulosa. Beberapa di antaranya dikembangkan oleh Komunitas Teknik Kimia ITB. Produk-produk ini bervariasi mulai dari sektor energi seperti bioetanol dan biobutanol; hingga sektor pangan seperti ragi kering dan asam sitrat. Berikut ini bahasan tentang produk-produk yang dikembangkan tersebut.

5.1 Bioetanol

Bioetanol adalah bahan kimia yang dimanfaatkan untuk pangan (minuman), bahan kimia dan farmasi, hingga sebagai bahan bakar alternatif terbarukan. Sebagian besar bioetanol diproduksi melalui fermentasi dengan bahan baku karbohidrat monosakarida/disakarida seperti gula tebu, maupun karbohidrat polisakarida seperti pati dan selulosa. Sebagai bahan bakar terbarukan alternatif dari bensin, bioetanol memiliki sejumlah keuntungan antara lain: mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, mengurangi emisi gas rumah kaca dan sebagai produk terbarukan.

Beberapa penelitian di Teknik Kimia ITB yang berkaitan dengan produksi bioetanol antara lain adalah produksi enzim amilase sebagai salah satu enzim yang digunakan di industri bioetanol berbasis pati (Purwadi et al., 2009a). Enzim amilase diproduksi dari pati singkong dengan menggunakan mikroorganisme *Aspergillus niger*. Penelitian ini menjadi bagian tugas akhir dan tesis dari mahasiswa program sarjana dan magister di Program Studi Teknik Kimia.

Penggunaan singkong sebagai bahan baku industri bioetanol menyisakan masalah terbentuknya senyawa metanol melebihi batas yang ditetapkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI 7390; 2008) sebesar 300 ppm. Penelitian untuk menghilangkan metanol di dalam produk etanol dilakukan dengan menggunakan mikroorganisme mutan *Pichia pastoris* GS115 mut+ yang dapat mengasimilasi metanol. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Pichia pastoris* GS115 mut+ bersama dengan ragi *Saccharomyces cerevisiae* (co-culture) dapat mendegradasi metanol hingga 19.65%, sedangkan apabila fermentasi dilaksanakan secara seri untuk masing-masing mikroorganisme, metanol dapat terdegradasi hingga 23.15% (Zilfahmiati and Purwadi, R, 2012).

Fermentasi bioetanol secara kontinu belum banyak digunakan di Indonesia, tetapi mode operasi ini sudah banyak diaplikasikan di negara-negara lain seperti Brazil, Swedia dls. Penelitian tentang fermentasi hidrolisat (cairan hasil hidrolisis lignoselulosa) secara kontinu sudah banyak dilakukan para peneliti, tetapi terbatas pada laju rendah akibat hadirnya senyawa-senyawa racun yang menginhibisi ragi *Saccharomyces cerevisiae*. Penyingkiran senyawa racun dapat dilakukan melalui proses detoksifikasi menggunakan kalsium hidroksida (*lime*). Proses yang biasa disebut *overliming* dilaksanakan dengan menambahkan kalsium hidroksida ke dalam hidrolisat hingga suasana basa ($\text{pH} > 10$), kemudian ditahan beberapa lama sebelum dinetralkan kembali ke pH fermentasi (pH 5). Proses ini cukup efektif menghilangkan senyawa-senyawa inhibitor dan meningkatkan fermentabilitas hidrolisat (Purwadi et al., 2004).

Fermentasi bioetanol kontinu berlangsung efektif apabila jumlah ragi sebagai mikroorganisme kerja dijaga pada konsentrasi yang tinggi. Namun pada fermentasi kontinu, ragi dapat terbawa aliran keluar fermentor bersama dengan produk bioetanol. Salah satu cara mempertahankan ragi di dalam fermentor adalah dengan imobilisasi ragi dengan kalsium alginat (Purwadi and Taherzadeh, 2008). Dengan cara ini, laju dilusi dari fermentasi kontinu dapat dipertahankan hingga 0.8 jam^{-1} dan asimilasi substrat sebanyak 86%.

Cara lain mempertahankan ragi di dalam fermentor adalah dengan melakukan daur ulang ragi. Daur ulang ragi dapat meningkatkan konsentrasi ragi di dalam fermentor hingga 35 g-ragi kering/L (Purwadi et al., 2007). Fermentasi dapat dipertahankan pada laju 0.52 jam^{-1} dengan perolehan etanol sebesar 0.46 g-etanol/g-glukosa.

5.2 Biobutanol

Biobutanol adalah bahan bakar terbarukan yang dihasilkan melalui fermentasi ABE (aseton-butanol-etanol) menggunakan bakteri *Clostridium* sp. Biobutanol dapat digunakan sebagai pelarut atau bahan bakar terbarukan yang kompatibel dengan bensin. Biobutanol memiliki sifat fisik dan kimia yang lebih mirip dengan bensin dibandingkan bioetanol; memiliki energi per liter yang lebih tinggi; dan dapat dicampur dengan bensin tanpa modifikasi mesin kendaraan. Seperti halnya bioetanol, biobutanol dapat dihasilkan dari

fermentasi berbagai sumber karbohidrat, baik monosakarida maupun polisakarida termasuk lignoselulosa.

Pengembangan produksi biobutanol di Teknik Kimia ITB diawali dengan mempelajari proses kultivasi bakteri *Clostridium* sp. yang bersifat anaerobik ketat (*strictly-anaerob*) (Purwadi et al., 2015). Salah satu peralatan yang diperoleh dari Chevron yaitu *anarobic chamber* sangat bermanfaat dalam melaksanakan penelitian ini. Selain itu, studi tentang produksi biobutanol melalui fermentasi kontinu menggunakan bakteri *Clostridium saccharobytylicum* NRRL B643 yang diimobilisasi pada Ca-alginate juga telah dilaksanakan (Anggraeni et al., 2015).

5.3 Ragi Kering

Ragi kering adalah salah satu bahan tambahan pangan yang umum digunakan dalam pembuatan roti dan kue. Ragi roti atau biasa dikenal sebagai *Saccharomyces cerevisiae* umumnya diproduksi melalui fermentasi aerobik. Bahan baku yang digunakan sangat beragam mulai dari mono-/di-sakarida seperti gula pasir (gula tebu) hingga hidrolisat dari proses hidrolisis polisakarida seperti pati atau selulosa.

Penelitian pembuatan ragi kering di Teknik Kimia ITB dilakukan dengan menggunakan spray-dryer (EYELA @ *Spray Dryer* SD-1). Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan kondisi operasi pengeringan yang optimum agar ragi yang dihasilkan memiliki keaktifan ragi yang baik (dinyatakan sebagai viabilitas - yaitu persentase sel hidup, dan vitalitas - persentase sel yang dapat berkembang biak). Kondisi operasi yang diamati antara lain adalah laju alir umpan (100-200 mL/jam), dan temperatur udara pengering (70-90 °C). Hasil menunjukkan bahwa kondisi dengan temperatur 70 °C dan laju alir umpan 200 mL/jam adalah kondisi optimum yang menghasilkan ragi kering dengan kandungan air 2-7% (Purwadi et al., 2009b).

Salah satu faktor yang memengaruhi perubahan viabilitas dan vitalitas ragi selama proses pengeringan adalah perubahan permeabilitas membran sitoplasma. Apabila permeabilitas membran ini meningkat, maka migrasi molekul ukuran kecil seperti air dan asam organik juga meningkat. Penambahan senyawa-senyawa seperti xilosa, maltodekstrin dan karboksimetil selulosa (CMC) sebanyak 1 s/d 5% biasa digunakan untuk mikroenkapsulasi. Senyawa-senyawa ini berfungsi untuk menggantikan air

yang terlibat dalam mempertahankan struktur tersier protein melalui ikatan hidrogen eksternal yang berlapis. Melalui mikroenkapsulasi, viabilitas ragi dapat meningkat hingga 2 kali lipat.

Selain itu, peningkatan umur simpan ragi kering juga dapat dilaksanakan dengan memproteksi ragi menggunakan bahan antioksidan. Bahan antioksidan sintesis seperti BHA dan BHT diduga bersifat karsinogenik, sehingga bahan-bahan antioksidan lain seperti asam sitrat, asam askorbat natrium eritorbat, tokoferol dan askorbil palmitat digunakan sebagai antioksidan alternatif (Purwadi et al., 2021). Formulasi terbaik penggunaan antioksidan untuk ragi kering terproteksi adalah dengan 0,5% asam sitrat, 0,5% asam askorbat. Ragi yang dihasilkan dengan formulasi ini mudah larut dalam air dan memiliki granula yang lebih halus.

5.4 Asam Sitrat

Asam sitrat adalah asam organik yang biasa ditemukan di dalam buah-buahan sitrus seperti lemon, jeruk, dan limau. Asam sitrat sering digunakan sebagai pengawet makanan alami dan penambah rasa asam/segar dalam industri makanan-minuman. Karena sifatnya yang aman dan ramah lingkungan, asam sitrat digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi komersial mulai dari farmasi, kosmetik hingga produk pembersih.

Di industri, asam sitrat biasanya diproduksi melalui proses fermentasi menggunakan mikroorganisme *Aspergillus niger* yang mampu mengubah gula menjadi asam sitrat dengan efisien. Proses ini lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan metode ekstraksi dari sumber alami seperti buah-buahan. Selain kegunaan utamanya sebagai aditif pangan, asam sitrat juga sering digunakan dalam bidang medis sebagai agen pengkelat untuk mengikat logam berat sehingga toksisitasnya turun. Pada aplikasi pembersih rumah tangga, asam sitrat sering digunakan karena efektif dalam melarutkan kerak mineral dan noda.

Penelitian tentang produksi asam sitrat dilaksanakan di Program Studi Teknik Pangan ITB dan berfokus pada pengaturan kondisi operasi seperti temperatur dan penambahan metanol ke dalam medium fermentasi untuk meningkatkan produktivitas asam sitrat. Temperatur 37 °C dan menambahkan 2% metanol adalah kondisi terbaik untuk menghasilkan asam sitrat sebanyak 67,17 mg/g substrat. Faktor yang signifikan terhadap perolehan asam sitrat

adalah temperatur, konsentrasi metanol, jumlah medium fermentasi, interaksi antara temperatur dan konsentrasi metanol, serta interaksi antara temperatur dan jumlah medium fermentasi.

Masih banyak produk-produk turunan lignoselulosa yang masih dikembangkan di lingkungan Komunitas Teknik Kimia ITB. Produk-produk tersebut antara lain seperti benzen-toluen-xilen (BTX) dari lignin, vanilin dari asam ferulat - produk hidrolisis lignin, xilitol dari xilosa - produk hidrolisis hemiselulosa, dan selulosa nanokomposit. Pengembangan produk hilir turunan lignoselulosa lainnya masih terus didorong dan dikembangkan.

6. PENUTUP

Indonesia memiliki potensi besar akan sumber daya lignoselulosa yang berlimpah, terutama dari hasil dan limbah pertanian dan perkebunan. Sumber daya ini dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan berbagai produk bernilai tinggi, seperti bahan bakar terbarukan (bioetanol, biobutanol) atau bahan kimia industri lainnya melalui teknologi pengolahan yang tepat dan efisien. Dengan memanfaatkan lignoselulosa, Indonesia tidak hanya dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, tetapi juga meningkatkan daya saing industri hijau serta membuka lapangan kerja baru. Pengolahan sumber lignoselulosa secara berkelanjutan dapat menjadi pilar penting untuk mendorong ekonomi sirkular dan kemakmuran bangsa.

Untuk mewujudkan hal tersebut, dukungan teknologi pengolahan lignoselulosa menjadi sangat penting. Teknologi proses fraksinasi lignoselulosa menjadi komponen-komponennya perlu dikembangkan agar proses ini dapat berjalan secara efisien dan ekonomis. Masih banyak pekerjaan rumah yang harus dipikirkan, dikerjakan dan diselesaikan. Proses *pretreatment* umumnya masih berlangsung secara batch, tidak praktis dan membutuhkan energi yang besar. Proses hidrolisis membutuhkan enzim yang murah agar produk akhir yang dihasilkan dapat bersaing di pasaran. Produk-produk turunan yang diproduksi dengan bahan baku glukosa hasil hidrolisis lignoselulosa juga masih harus diteliti dan dikembangkan.

Peran Pemerintah sangat membantu, baik dari sisi regulasi dan kebijakan maupun untuk mendorong percepatan implementasi di sektor-sektor industri strategis. Insentif bagi industri yang memanfaatkan lignoselulosa sebagai bahan baku mungkin dapat mendorong pertumbuhan industri serupa. Pertumbuhan industri ini turut menciptakan lapangan kerja, meningkatkan kesejahteraan masyarakat dan memiliki dampak ekonomi yang kuat. Pemerintah juga dapat memberikan insentif kepada para peneliti untuk menciptakan produk dan/atau proses baru yang memberi nilai ekonomi yang baik. Tentunya, penemuan-penemuan baru yang berguna ini dapat diadopsi kembali oleh industri dan mendorong berdirinya industri-industri berbasis lignoselulosa yang baru. Dengan demikian, ekonomi sirkular dapat berlangsung positif, membesar dan meluas.

Institut Teknologi Bandung memiliki kapasitas dan reputasi yang baik di bidang teknologi proses, khususnya di bidang pengolahan lignoselulosa turut serta menjadi agen perkembangan teknologi ini. Pengembangan teknologi yang tepat membutuhkan investasi dalam riset, pengembangan infrastruktur, kolaborasi antara pemerintah, industri, dan akademisi. Dengan fokus pada pengembangan industri berbasis lignoselulosa ini, Indonesia dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, mendukung pencapaian target emisi karbon yang lebih rendah, menghasilkan produk-produk baru yang kompetitif, sehingga pada akhirnya dapat berkontribusi secara signifikan pada kesejahteraan bangsa dan kelestarian lingkungan.

3. UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan penuh rasa syukur kepada Tuhan Yang Maha Pengasih dan Penyayang, yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk mengemban tugas sebagai Guru Besar di Institut Teknologi Bandung dalam bidang Teknologi Proses Konversi Biomassa.

Dalam kesempatan ini saya ingin menyampaikan terima kasih kepada segenap pimpinan Institut Teknologi Bandung: Rektor beserta jajarannya; Pimpinan dan Anggota Senat Akademik ITB; Pimpinan dan Anggota Forum Guru Besar ITB; atas kesempatan yang diberikan kepada saya untuk menyampaikan orasi ilmiah pada forum yang terhormat ini.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada semua pihak yang telah mendukung saya dalam meniti karier sebagai dosen hingga mencapai jabatan akademik Guru Besar di ITB. Saya memohon maaf sebesar-besarnya apabila terdapat kesalahan dalam penyampaian baik secara tertulis maupun terucap. Saya juga memohon maaf kepada pihak-pihak yang turut berperan namun luput tertulis dalam uraian ini.

Terima kasih yang tak ternilai kepada orang tua saya yang terkasih: ayahanda Abdul Wahab (alm.) dan ibunda Lily Gunawati yang telah mendukung dan mendorong saya menjadi seorang dosen. Terima kasih yang tulus kepada istri saya tercinta: Vera Limarga yang menjadi teman dalam senang maupun susah, senantiasa sabar menemani saya dalam meniti karier; anak-anak saya: Joshua Anugerah Purwadi dan Joseph Abdisetia Purwadi yang menjadi kebanggaan kami. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Adinda Saeful Rochman sekeluarga yang telah memberi warna dalam kehidupan saya.

Terima kasih kepada Dekanat dan Pimpinan Fakultas Teknologi Industri ITB: Prof. Brian Yulianto, Prof. Yogi Wibisono Budhi, dan Prof. Ari Widyanti yang mendorong dan mengawal proses pengusulan guru besar saya sejak awal di ITB hingga akhir.

Terima kasih kepada Prof. Saswinadi Sasmojo, Dr. Tatang Hernas Soerawidjaja, Prof. Danu Ariono, Dr. Irwan Noezar, Prof. Dwiwahju Sasongko, Prof. Herri Susanto, Prof. Tjandra Setiadi, Dr. Tri Partono Adhi dan Dr. Sanggono Adisasmito yang berperan sebagai pemimpin, mentor,

inspirasi, penyemangat, pendorong dan mendukung saya untuk menjadi dosen yang baik.

Terima kasih kepada Prof. Mohammad Taherzadeh dan Prof. Claes Niklasson sebagai pembimbing saya selama menempuh program doktor di Chalmers University of Technology di Swedia. Terima kasih untuk kesempatan mengenal teknologi bioetanol generasi ke-2 dan menjadi pakar di bidang ini.

Terima kasih kepada Prof. Mohammad Taherzadeh (UB), Prof. Arief Widjaja (TK-ITS), Prof. Astri Rinanti (TK-Trisakti), Prof. Hermawan K. Dipojono (TF-ITB), Prof. Elfahmi (SF-ITB), Prof. Tjandra Setiadi (KK Produk Teknik Kimia Berkelanjutan FTI-ITB), Prof. Yazid Bindar (KK Teknik Pangan dan Kemurgi FTI ITB) yang telah memberikan rekomendasi guru besar.

Terima kasih kepada Prof. Saswinadi, Ir. Wibowo Suryowidjojo (alm.), Ir. Jusuf Mu'min (alm.), Dr. Tatang Hernas Soerawidjaja, Prof. Subagjo, Prof. Danu Ariono, Ir. Parikesit (alm.), Prof. Mubiar Purwasasmita (alm.), Ir. Handi Argasetya (alm.), Dr. Tri Partono Adhi dan guru-guru saya di Teknik Kimia ITB yang saya tidak dapat sebutkan satu per satu.

Terima kasih kepada rekan-rekan seperjuangan di Prodi Teknik Pangan ITB: Prof. Lienda Aliwarga, Prof. MTA Penia Kresnowati, Dr. Dianika Lestari, Dr. Dian Shofinita, Dr. Helen Julian, Dr. Burhannudin Sutisna, Dr. Daniel Pramudita dan Giovanny A. Sumampouw, S.T., M.Sc. yang selalu bergotong-royong dalam melaksanakan tugas dan mengembangkan Program Studi Teknik Pangan ITB.

Terima kasih juga atas dukungan rekan-rekan di Kelompok Keahlian Teknik Pangan dan Kemurgi FTI ITB: Prof. Lienda Aliwarga, Prof. Yazid Bindar, Prof. MTA Penia Kresnowati, Dr. Dianika Lestari, Dr. Meiti Pratiwi, Dr. Astri Nur Istiyami, Dr. Dian Shofinita, Dr. Aqsha, Dr. Daniel Pramudita, Dr. Burhannudin Sutisna, dan Giovani Sumampouw, S.T., M.Sc. atas dukungan, kebersamaan dan keceriaan. Terima kasih juga kepada Dr. C.B. Rasrendra, Dr. Antonius Indarto, Dr. Jenny Rizkiana, dan Dr. Helen Julian, serta yang turut menghangatkan suasana akademik dan kebersamaan di FTI ITB Kampus Jatinangor.

Terima kasih kepada Dr. Ukan Sukandar, Prof. Tjandra Setiadi, Prof. MTA Penia Kresnowati, Dr. Ardiyan Harimawan, Dr. Vita Wonoputri dan Dr.

Guntur Adisurya; serta para tenaga kependidikan (Dewi, Ratna dan Wahyu) dalam kerja sama saling mendukung kegiatan di Lab. Rekayasa Bioproses Teknik Kimia ITB.

Terima kasih kepada Dr. Andreas Widodo, Dr. Rina Mariyana, Dr. Azka Azkiya Choliq, Mur Aini Merdekawati, S.Si, Yohanos Eko Chandra, Andry dan rekan-rekan dari PT. Rekayasa Industri; dan Dr. Krisna Septiningrum dari BBPJIA Kemenperin; atas kerja sama yang baik dalam mengembangkan teknologi fraksionasi lignoselulosa.

Terima kasih atas kebaikan sahabat-sahabat saya: Prof. IGBN Makertiharta dan Prof. MTA Penia Kresnowati yang telah melakukan penelaahan buku orasi ilmiah ini.

Terima kasih kepada Dr. Hanny F. Sangian dan rekan-rekan dari Universitas Sam Ratulangi atas kerja sama yang baik dalam penelitian dan pengembangan ilmu pengetahuan.

Terima kasih atas kerja sama dan saling mendukung kepada rekan-rekan dalam tim penelitian: Prof. MTA Penia Kresnowati dan Dr. C.B. Rasrendra (tim BLIR); Dr. Meiti Pratiwi, Dr. Astri Nur Istiyami, Prof. Godlief Neonufa (UKAW), Dr. Lidya Elizabeth, ST.MT., Dr. Endang Puspawiningtyas (tim Biofuel); Dr. Meiti Pratiwi, Dr. Astri Nur Istiyami, Dr. Vita Wonoputri, Dr. Dianika Lestari (tim PKAPB); Dr. Vita Wonoputri, Prof. MTA Penia Kresnowati (tim Selulase); Dr. Antonius Indarto (tim Donggi); Dr. C.B. Rasrendra, Dr. Jenny Rizkiana, Dr. Daniel Pramudita, Dr. Melia Laniwati, Prof. IGBN Makertiharta (tim Sawit-J76); dan tim-tim lainnya yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu.

Terima kasih kepada rekan-rekan sejawat di Komunitas Teknik Kimia yang dipimpin oleh Dr. Hary Devianto (Prodi Teknik Kimia); Prof. MTA Penia Kresnowati (Prodi Teknik Pangan); dan Dr. Antonius Indarto (Prodi Teknik Bioenergi dan Kemurgi); atas kebersamaan dan kerja sama yang sangat baik. Terima kasih atas partisipasi rekan-rekan dalam menciptakan suasana ceria dan riang gembira di komunitas kita.

Terima kasih kepada seluruh tenaga kependidikan di Program Studi Teknik Kimia; Program Studi Teknik Pangan; dan Program Studi Teknik Bioenergi; yang selalu ringan tangan membantu. Terima kasih atas suasana kerja yang harmonis dan saling menghargai.

Terima kasih untuk teman-teman dari TK 83 dan SMAN 9 Bandung angkatan 82 - yang senantiasa menjalin persahabatan seperti persaudaraan.

Terima kasih kepada PT Rekayasa Industri yang sudah memberikan dana penelitian untuk mengembangkan teknologi fraksionasi lignoselulosa ini.

Terima kasih untuk Badan Pengelola Dana Kelapa Sawit (BPDPKS) yang sudah bersedia membiayai pengembangan teknologi fraksionasi lignoselulosa. Semoga cita-cita kita bersama cepat terwujud.

Terima kasih untuk PT Pertamina yang sudah memberikan dana penelitian untuk mengembangkan teknologi produksi biobutanol.

Terima kasih untuk semua mahasiswa yang telah ataupun sedang saya ajar dan bimbing. Kalian adalah alasan saya menjadi Guru Besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdi, N., Hamdache, F., Belhocine, D., Grib, H., Lounici, H., Piron, D.L., Mameri, N., 2000. Enzymatic saccharification of solid residue of olive mill in a batch reactor. *Biochem. Eng. J.* 6, 177–183.
[https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(00\)00085-1](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(00)00085-1)
- Abramson, M., Shoseyov, O., Shani, Z., 2010. Plant cell wall reconstruction toward improved lignocellulosic production and processability. *Plant Sci.* 178, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.11.003>
- Aita, G.A., Salvi, D.A., Walker, M.S., 2011. Enzyme hydrolysis and ethanol fermentation of dilute ammonia pretreated energy cane. *Bioresour. Technol.* 102, 4444–4448.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.095>
- Ali, N., Ting, Z., Khan, Y.H., Athar, M.A., Long, M., 2014. Enzymatic hydrolysis of cellulosic biomass for the production of biofuels, A Review 2.
- Ang, S.K., E.M., S., Y., A., A.A, S., M.S, M., 2013. Production of cellulases and xylanase by *Aspergillus fumigatus* SK1 using untreated oil palm trunk through solid state fermentation. *Process Biochem.* 48, 1293–1302.
<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.06.019>
- Anggraeni, I.D., Mienda, A., Santihayu, M., Purwadi, R., 2015. Initial study of continuous butanol production by cell-entrapment *Clostridium saccharobutylicum* NRRL B643 in ca-alginate, in: *The 22th Regional Symposium on Chemical Engineering 2015*. Bangkok, Thailand.
- Arrhenius, S., 1896. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philos. Mag. J. Sci.* 41, 237–276.
- Ballesteros, I., Oliva, J.M., Negro, M.J., Manzanares, P., Ballesteros, M., 2002. Enzymic hydrolysis of steam exploded herbaceous agricultural waste (*Brassica carinata*) at different particule sizes. *Process Biochem.* 38, 187–192. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(02\)00070-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(02)00070-5)
- Baruah, J., Nath, B.K., Sharma, R., Kumar, S., Deka, R.C., Baruah, D.C., Kalita, E., 2018. Recent Trends in the Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Value-Added Products. *Front. Energy Res.* 6, 141.
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00141>
- Behera, S.S., Ray, R.C., 2016. Solid state fermentation for production of microbial cellulases: Recent advances and improvement strategies. *Int. J. Biol. Macromol.* 86, 656–669.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.10.090>

- Brethauer, S., Shahab, R.L., Studer, M.H., 2020. Impacts of biofilms on the conversion of cellulose. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 104, 5201–5212. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10595-y>
- Chris Somerville, 2006. The Billion-Ton Biofuels Vision. *SCIENCE* 312, 1277.
- Curreli, N., Agelli, M., Pisu, B., Rescigno, A., Sanjust, E., Rinaldi, A., 2002. Complete and efficient enzymic hydrolysis of pretreated wheat straw. *Process Biochem.* 37, 937–941. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(01\)00301-6](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(01)00301-6)
- Da Costa Sousa, L., Chundawat, S.P., Balan, V., Dale, B.E., 2009. ‘Cradle-to-grave’ assessment of existing lignocellulose pretreatment technologies. *Curr. Opin. Biotechnol.* 20, 339–347. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2009.05.003>
- Dale, B.E., 2003. ‘Greening’ the chemical industry: research and development priorities for biobased industrial products. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 78, 1093–1103. <https://doi.org/10.1002/jctb.850>
- Demirbas, A., 2009. Biorefineries: Current activities and future developments. *Energy Convers. Manag.* 50, 2782–2801. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.06.035>
- Domínguez, J.C., Santos, T.M., Rigual, V., Oliet, M., Alonso, M.V., Rodriguez, F., 2018. Thermal stability, degradation kinetics, and molecular weight of organosolv lignins from *Pinus radiata*. *Ind. Crops Prod.* 111, 889–898. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.059>
- El-Zawawy, W.K., Ibrahim, M.M., Abdel-Fattah, Y.R., Soliman, N.A., Mahmoud, M.M., 2011. Acid and enzyme hydrolysis to convert pretreated lignocellulosic materials into glucose for ethanol production. *Carbohydr. Polym.* 84, 865–871. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.12.022>
- Ezeilo, U.R., Lee, C.T., Huyop, F., Zakaria, I.I., Wahab, R.A., 2019. Raw oil palm frond leaves as cost-effective substrate for cellulase and xylanase productions by *Trichoderma asperellum* UC1 under solid-state fermentation. *J. Environ. Manage.* 243, 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.113>
- García-Ochoa, F., Santos, V.E., Casas, J.A., Gómez, E., 2000. Xanthan gum: production, recovery, and properties. *Biotechnol. Adv.* 18, 549–579. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(00\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00050-1)
- Glasser, W.G., 2021. Biorefining - De-Lignification vs. De-Saccharification. *Acad. Lett.* <https://doi.org/10.20935/AL1238>
- González-García, S., Moreira, M.T., Feijoo, G., 2010. Comparative environmental performance of lignocellulosic ethanol from different feedstocks. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 2077–2085. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.035>

- Guo, G.-L., Hsu, D.-C., Chen, Wen-Hua, Chen, Wei-Hsi, Hwang, W.-S., 2009. Characterization of enzymatic saccharification for acid-pretreated lignocellulosic materials with different lignin composition. *Enzyme Microb. Technol.* 45, 80–87.
<https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2009.05.012>
- Gusakov, A.V., Salanovich, T.N., Antonov, A.I., Ustinov, B.B., Okunev, O.N., Burlingame, R., Emalfarb, M., Baez, M., Sinitsyn, A.P., 2007. Design of highly efficient cellulase mixtures for enzymatic hydrolysis of cellulose. *Biotechnol. Bioeng.* 97, 1028–1038.
<https://doi.org/10.1002/bit.21329>
- Haghighi Mood, S., Hossein Golfeshan, A., Tabatabaei, M., Salehi Jouzani, G., Najafi, G.H., Gholami, M., Ardjmand, M., 2013. Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 27, 77–93.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.033>
- Idris, A.S.O., Pandey, A., Rao, S.S., Sukumaran, R.K., 2017. Cellulase production through solid-state tray fermentation, and its use for bioethanol from sorghum stover. *Bioresour. Technol.* 242, 265–271.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.092>
- Intasit, R., Cheirsilp, B., Suyotha, W., Boonsawang, P., 2021. Synergistic production of highly active enzymatic cocktails from lignocellulosic palm wastes by sequential solid state-submerged fermentation and co-cultivation of different filamentous fungi. *Biochem. Eng. J.* 173, 108086. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108086>
- Islam, M.K., Thaemngoen, A., Lau, C.Y., Guan, J., Yeung, C.S., Chairapat, S., Leu, S.-Y., 2021. Staged organosolv pretreatment to increase net energy and reactive lignin yield in whole oil palm tree biorefinery. *Bioresour. Technol.* 326, 124766.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124766>
- Kumar, S., Singh, S.P., Mishra, I.M., Adhikari, D.K., 2009. Recent Advances in Production of Bioethanol from Lignocellulosic Biomass. *Chem. Eng. Technol.* 32, 517–526. <https://doi.org/10.1002/ceat.200800442>
- Labauze, H., Benjelloun-Mlayah, B., 2021. Kinetics of xylan hydrolysis using an acetic and formic acid-based organosolv pretreatment. *Bioresour. Technol. Rep.* 14, 100690. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100690>
- Labauze, H., Cachet, N., Benjelloun-Mlayah, B., 2022. Acid-based organosolv lignin extraction from wheat straw: Kinetic and structural analysis. *Ind. Crops Prod.* 187, 115328.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115328>
- Larsson, S., Palmqvist, E., Hahn-Hägerdal, B., Tengborg, C., Stenberg, K., Zacchi, G., Nilvebrant, N.-O., 1999. The generation of fermentation

- inhibitors during dilute acid hydrolysis of softwood. *Enzyme Microb. Technol.* 24, 151–159. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(98\)00101-X](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(98)00101-X)
- Lee, C.K., Darah, I., Ibrahim, C.O., 2011. Production and Optimization of Cellulase Enzyme Using *Aspergillus niger* USM AI 1 and Comparison with *Trichoderma reesei* via Solid State Fermentation System. *Biotechnol. Res. Int.* 2011, 1–6. <https://doi.org/10.4061/2011/658493>
- Luo, C., Brink, D.L., Blanch, H.W., 2002. Identification of potential fermentation inhibitors in conversion of hybrid poplar hydrolyzate to ethanol. *Biomass Bioenergy.*
- Mardawati, E., Kresnowati, M., Purwadi, R., Bindar, Y., Setiadi, T., 2018. Fungal Production of Xylanase from Oil Palm Empty Fruit Bunches via Solid State Cultivation. *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.* 8, 2539. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.8.6.4196>
- Mariyana, R., Azkiya Choliq, A., Adi Rahmanto, K., Nugroho, Y., Purwadi, R., Kresnowati, M., Septiningrum, K., Frans, B.M.D., 2021. Integrated Biorefinery Technology: Monetization of Oil Palm Empty Fruit Bunch to Biofuel & Bio-based Chemicals, and Beyond. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 1143, 012053. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1143/1/012053>
- Martinez, A., Rodriguez, M.E., York, S.W., Preston, J.F., Ingram, L.O., 2000. Effects of Ca(OH)₂ treatments (“overliming”) on the composition and toxicity of bagasse hemicellulose hydrolysates. *Biotechnol. Bioeng.* 69, 526–536. [https://doi.org/10.1002/1097-0290\(20000905\)69:5<526::AID-BIT7>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1097-0290(20000905)69:5<526::AID-BIT7>3.0.CO;2-E)
- Mendes, F.B., Ibraim Pires Atala, D., Thoméo, J.C., 2017. Is cellulase production by solid-state fermentation economically attractive for the second generation ethanol production? *Renew. Energy* 114, 525–533. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.062>
- Meng, X., Parikh, A., Nagane, N., Seemala, B., Kumar, R., Cai, C.M., Pu, Y., Wyman, C.E., Ragauskas, A.J., n.d. Chemical transformations of poplar lignin during co-solvent enhanced lignocellulosic fractionation process.
- Mosier, N., 2005. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresour. Technol.* 96, 673–686. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.025>
- Pérez, J., Muñoz-Dorado, J., De La Rubia, T., Martínez, J., 2002. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *Int. Microbiol.* 5, 53–63. <https://doi.org/10.1007/s10123-002-0062-3>
- Purwadi, R., Amanta, C., Lan, N.L., 2009a. Pengaruh Nisbah C/N dan Laju Aerasi Terhadap Produksi Enzim Amilase Menggunakan *Aspergillus niger* 6.

- Purwadi, R., Brandberg, T., Taherzadeh, M.J., 2007. A Possible Industrial Solution to Ferment Lignocellulosic Hydrolyzate to Ethanol: Continuous Cultivation with Flocculating Yeast. *Int. J. Mol. Sci.* 8, 920–932. <https://doi.org/10.3390/i8090920>
- Purwadi, R., Nicko, Stephanie, P., 2009b. Optimasi temperatur udara pengering dan laju alir umpan pada proses pengeringan ragi roti 8, 5.
- Purwadi, R., Niklasson, C., Taherzadeh, M.J., 2004. Kinetic study of detoxification of dilute-acid hydrolyzates by Ca(OH)₂. *J. Biotechnol.* 114, 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2004.07.006>
- Purwadi, R., Rasrendra, C.B., Restiawaty, E., Sukma, M.S., 2015. Pengembangan Metode Kultivasi Solventogenic clostridia untuk Proses Produksi Biobutanol 10.
- Purwadi, R., Taherzadeh, M.J., 2008. The performance of serial bioreactors in rapid continuous production of ethanol from dilute-acid hydrolyzates using immobilized cells. *Bioresour. Technol.* 99, 2226–2233. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.021>
- Purwadi, R., Wonoputri, V., Fitriana, F.U., Choliq, N.S., 2021. Variasi Antioksidan dalam Pembuatan Protected Active Dried Yeast. *J. Tek. Kim. Indones.* 19, 1. <https://doi.org/10.5614/jtki.2020.19.1.1>
- Saeman, J.F., 1945. Kinetics of wood saccharification: Hydrolysis of cellulose and decomposition of sugars in dilute acid at high temperature. *Ind. Eng. Chem.* 37, 43–52.
- Saha, B.C., Iten, L.B., Cotta, M.A., Wu, Y.V., 2008. Dilute Acid Pretreatment, Enzymatic Saccharification, and Fermentation of Rice Hulls to Ethanol. *Biotechnol. Prog.* 21, 816–822. <https://doi.org/10.1021/bp049564n>
- Sannigrahi, P., Pu, Y., Ragauskas, A., 2010. Cellulosic biorefineries—unleashing lignin opportunities. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 2, 383–393. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2010.09.004>
- Sidiras, D., Politi, D., Giakoumakis, G., Salapa, I., 2022. Simulation and optimization of organosolv based lignocellulosic biomass refinery: A review. *Bioresour. Technol.* 343, 126158. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126158>
- Silva, R. (Ed.), 2015. Enzymes Prospection from Fungi and Biomass Pretreatment for Biorefinery Application, in: *Mycology: Current and Future Developments*. BENTHAM SCIENCE PUBLISHERS, pp. 57–81. <https://doi.org/10.2174/9781681080741115010006>
- Silveira, M.H.L., Morais, A.R.C., da Costa Lopes, A.M., Oleksyszzen, D.N., Bogel-Lukasik, R., Andreus, J., Pereira Ramos, L., 2015. Current Pretreatment Technologies for the Development of Cellulosic Ethanol and Biorefineries. *ChemSusChem* 8, 3366–3390. <https://doi.org/10.1002/cssc.201500282>

- Sugiharto, Y.E.C., Harimawan, A., Kresnowati, M.T.A.P., Purwadi, R., Mariyana, R., Andry, Fitriana, H.N., Hosen, H.F., 2016. Enzyme feeding strategies for better fed-batch enzymatic hydrolysis of empty fruit bunch. *Bioresour. Technol.* 207, 175–179. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.113>
- Sun, Y., Cheng, J., 2005. Dilute acid pretreatment of rye straw and bermudagrass for ethanol production. *Bioresour. Technol.* 96, 1599–1606. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.12.022>
- Sun, Y., Cheng, J., 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review q. *Bioresour. Technol.*
- Taherzadeh, M.J., Gustafsson, L., Niklasson, C., Lidén, G., 1999. Conversion of furfural in aerobic and anaerobic batch fermentation of glucose by *Saccharomyces cerevisiae*. *J. Biosci. Bioeng.* 87, 169–174. [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(99\)89007-0](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(99)89007-0)
- Walker, L.P., Wilson, D.B., 1991. Enzymatic hydrolysis of cellulose: An overview. *Bioresour. Technol.* 36, 3–14. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(91\)90095-2](https://doi.org/10.1016/0960-8524(91)90095-2)
- Wonoputri, V., Subiantoro, S., Kresnowati, M.T.A.P., Purwadi, R., 2018. Solid State Fermentation Parameters Effect on Cellulase Production from Empty Fruit Bunch. *Bull. Chem. React. Eng. Catal.* 13, 553–559. <https://doi.org/10.9767/bcrec.13.3.1964.553-559>
- Yuan, Y., Jiang, B., Chen, H., Wu, W., Wu, S., Jin, Y., Xiao, H., 2021. Recent advances in understanding the effects of lignin structural characteristics on enzymatic hydrolysis. *Biotechnol. Biofuels* 14, 205. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-02054-1>
- Zilfahmiati, Purwadi, R., 2012. Comparation between multi-culture and series cultivation in bioethanol production using *S. cerevisiae* and *P pastoris* GS115 mut+, in: *Proceeding of 19th Regional Symposium of Chemical Engineering*. Bali, Indonesia.

CURRICULUM VITAE



Nama : Ronny Purwadi
Tempat/tgl lahir : Bandung, 1 Februari 1964
Kel. Keahlian : Teknologi Pangan dan Kemurgi
Alamat Kantor : Labtek X – Kampus ITB
Jl. Ganesha 10 Bandung
Nama Istri : Vera Limarga
Nama Anak : Joshua Anugerah Purwadi &
Joseph Abdisetia Purwadi

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

1. Sarjana Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung, 1988
2. Magister Teknik Kima, Institut Teknologi Bandung, 1995
3. Doktor di bidang Biochemical Engineering, Chalmers University of Technology, 2006
4. Pendidikan Profesi Insinyur, Institut Teknologi Bandung, 2020

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

1. Staf pengajar di Fakultas Teknologi Industri, ITB, 1990 - sekarang
2. Ketua Tim Penerimaan Barang - Proyek QUE TKITB, 2000-2001
3. Kepala Divisi Teknologi dan Produk - PP Bioteknologi ITB, 2007-2011
4. Anggota Tim Persiapan Penyetaraan ABET Teknik Kimia, ITB, 2007-2010
5. Pengelola Laboratorium Teknologi Pangan - Teknik Kimia ITB, 2006-2010
6. Anggota Tim Ekuivalensi Kurikulum Teknik Kima ITB, 2008
7. Kepala Lab. Simulasi Proses - Teknik Kimia ITB, 2008-2011
8. Tim Rencana Kegiatan dan Anggaran (RKA) dan Pengelola Sarana Prasarana FTI ITB untuk Teknik Kimia ITB, 2008-2011
9. Ketua Program Studi Magister dan Doktor Teknik Kimia ITB, 2012-2015
10. Tim Rencana Kegiatan dan Anggaran (RKA) Teknik Kimia, 2016-2017
11. Anggota Majelis Komunitas Teknik Kimia ITB, 2015-2016
12. Anggota Sub-komite Pendidikan Pascasarjana Teknik Kimia ITB, 2015-2016
13. Anggota Komite Pendidikan Pascasarjaan FTI ITB, 2015-2016
14. Ketua Program Studi Sarjana Teknik Pangan ITB, 2018-2020
15. Tim Rencana Kegiatan dan Anggaran (RKA) Teknik Pangan ITB, 2018-2020

16. Tim Rencana Kegiatan dan Anggaran (RKA) Teknik Pangan ITB, 2021-2022
17. Ketua Kelompok Keahlian Teknik Pangan dan Kemurgi ITB, 2023-skrng

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

1. Calon PNS - III/a, 1 Desember 1991
2. Penata Muda - III/a, 1 Mei 1994
3. Penata Muda Tk.1 - III/b, 1 April 1999
4. Penata - III/c, 1 Oktober 2012
5. Penata Tk.1 - III/d, 1 April 2015
6. Pembina - IV/a, 1 April 2024

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

1. Asisten Ahli Madya, 1 Mei 1994
2. Asisten Ahli, 1 Januari 2001
3. Lektor Kepala, 1 Juni 2012
4. Guru Besar, 1 Agustus 2023

V. KEGIATAN PENELITIAN

1. Riset Unggulan ITB, "Pemanfaatan limbah Biodiesel menjadi produk bernilai: langkah awal biorefinery", Peneliti Anggota, 2008
2. Riset Unggulan ITB, "Produksi dan pemisahan alpha-amylase dan glucoamylase skala pilot", Peneliti Utama, 2009
3. Kerma Penelitian dengan PT Rekayasa Industri, "Proyek Penelitian Perlakuan Awal Tandan Kosong Sawit dengan Basa Encer", Peneliti Utama, 2013-2015
4. Kerma Penelitian dengan PT Rekayasa Industri, "Proyek Penelitian Hidrolisis Tandan Kosong Sawit Hasil Perlakuan Awal dengan Basa Encer", Peneliti Utama, 2013-2015
5. Kerma Penelitian dengan PT Rekayasa Industri, "Proyek Penelitian Fermentasi Hidrolisat Tandan Kosong Sawit Hasil Perlakuan Awal dengan Basa Encer", Peneliti Utama, 2013-2015
6. Kerma Penelitian dengan PT. HM. Sampoerna, "Studi Metabolomik dari Cengkeh", Peneliti Utama, 2016-2018
7. Kerma Penelitian dengan PT. Pertamina, "Pengembangan produksi biobutanol melalui fermentasi", Peneliti Utama, 2017

8. Gran Riset Sawit BPDPKS, "Pengembangan Teknologi Produksi Bahan Bakar Terbarukan Tipe Drop-in via Dekarboksilasi dan Pirolisis Sabun Logam berbasis Minyak-minyak Sawit", Peneliti Utama, 2016-2017
9. Gran Riset Sawit BPDPKS, "Pengembangan Teknik Rancang Bangun Melalui Pabrik Pilot untuk Produksi Bahan Bakar Terbarukan Tipe Drop-in via Dekarboksilasi Sabun Logam berbasis Minyak-minyak Sawit", Peneliti Utama, 2018-2019
10. Kerma Penelitian dengan PT Rekayasa Industri, "Optimisasi Disain Reaktor Pengolahan Tandan Kosong Sawit untuk Produksi Bioetanol dan Berbagai Produk Bernilai Tambah", Peneliti Utama, 2019-2020
11. Kerma Penelitian dengan PT Paragon Technology and Inovation, "(1) Formulasi dan evaluasi body lotion yang mengandung lemak tengkawang dan lemak kakao; (2) Karakteristik fatty acid dan fatty alcohol dalam pembuatan body scrub", Peneliti Utama, 2020-2021
12. Gran Riset Sawit BPDPKS, "Peningkatan Kualitas dan Kuantitas Fraksi Bensin pada Produksi Bahan Bakar Terbarukan Tipe Drop-in via Dekarboksilasi/Pirolisis Sabun Basa Logam berbasis Minyak-minyak Sawit", Peneliti Utama, 2020-2021
13. Gran Riset Sawit BPDPKS, "Produksi Palm-kernel-amidopropyl-betaine (PKAPB) dari Minyak dan Asam Lemak Minyak Inti Sawit untuk Substitusi Coco-amidopropyl-betaine Impor", Anggota Peneliti, 2021-2022
14. Kerma Penelitian dengan PT Rekayasa Industri, "Proyek Penelitian Produksi Enzim Selulase", Peneliti Utama, 2022
15. Riset Sawit BPDPKS, "Inovasi lanjut katalis dan teknologi bensin sawit dan pengembangan teknologi produksi percontohan mixed industrial vegetable oil (MIVO) dan minyak makan sehat dari kelapa sawit", Anggota Peneliti, 2023-2024
16. Gran Riset Sawit BPDPKS, "Pengembangan metoda produksi enzim selulase untuk mendukung produksi bioetanol generasi kedua", Peneliti Utama, 2023-2024

VI. PUBLIKASI

JURNAL INTERNASIONAL

1. **Purwadi, R.**, Niklasson, C., Taherzadeh, M.J. (2004) Kinetic study of detoxification of dilute-acid hydrolyzates by Ca(OH)₂. Journal of Biotechnology, Vol. 114, pp. 187-198

2. **Purwadi, R.**, Taherzadeh, M.J. (2008) The performance of serial bioreactor in rapid continuous productions of ethanol from dilute-acid hydrolyzates using immobilized cells, *Bioresource Technology*, 99 (7), pp. 2226-2233.
3. **Purwadi, R.**, Brandberg, T., Taherzadeh, M.J.(2007) A possible industrial solution to ferment lignocellulosic hydrolyzate to ethanol: Continuous cultivation with flocculating yeast, *International Journal of Molecular Sciences*, 8 (9), 920-932
4. Mardawati, E., Wira, D.W., Kresnowati, MTAP., **Purwadi, R.**, Setiadi, T. (2015) Microbial Production of Xylitol from Oil Palm Empty Fruit Bunches Hydrolysate: The effect of glucose concentration, *Journal of The Japan Institute of Energy*, 94, 769-774
5. Sugiharto, YEC., Harimawan, A., Kresnowati, MTAP., **Purwadi, R.**, Mariyana, R., Andry, Fitriana, HN., Hosen, HF. (2016) Enzyme feeding strategies for better fed-batch enzymatic hydrolysis of empty fruit bunch, *Bioresource Technology*, 207, 175-179.
6. Octavia, S., Soerawidjaja, T.H., **Purwadi, R.**, Putrawan, I.D.G.A. (2017) The Advantages of Soaking with Aqueous Amonia Pre-treatment Process of Oil Palm Empty Fruit Bunches, *International Journal on Advance Science, Engineering and Information Technology*, 7(3), 865-870.
7. Mardawati, E., **Purwadi, R.**, Kresnowati, M.T.A.P., Setiadi, T. (2017) Evaluation of the enzymatic hydrolysis process of Oil Palm fruit bunch using crude fungal xylanase, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(18), 5286-5292.
8. Octavia, S., **Purwadi, R.**, Putrawan, I.D.G.A., Soerawidjaja, T.H. (2017) *ARPN Journal of Engineering and Applied Science*, 12(18), 5307-5312.
9. Rinanti, A., **Purwadi, R.** (2018) Harversting of freshwater microalgae biomass by *Scenedesmus* sp as bioflucculant, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 106(1), 012087.
10. Rinanti, A., **Purwadi, R.** (2018) Bioflocculation Activity in Harvesting System: A Biotechnology Approach for Microalgae Biomass, *Aceh International Journal of Science and Technology*, 7 (1), 69 – 76.
11. Anggraini, I., Kresnowati, M.T.A.P., **Purwadi, R.**, Setiadi, T. (2018) Bioethanol Production via Syngas Fermentation, *MATEC Web of Conferences*, 156, 03025.
12. Akmalina, R., **Purwadi, R.**, Sitompul, J. (2018) Bioconversion studies of methyl laurate to dodecanedioic acid using a wild-type of *Candida Tropicalis*, *MATEC Web of Conferences* 156, 01001.

13. Neonufa, F.G., Pratiwi, M., Istiyami, A.N., Elizabeth, L., Dewi, S.S., **Purwadi, R.**, Prakoso, T., Soerawidjaja, T.H. (2018) An innovative method to produce drop-in fuel by alkaline earth-transition metals basic soap decarboxylation, MATEC Web of Conferences 156, 02064.
14. Mardawati, E., Kresnowati, MTAP., **Purwadi, R.**, Bindar, Y., Setiadi, T. (2018) Fungal Production of Xylanase from Oil Palm Empty Fruit Bunches via Solid State Cultivation, International Journal on Advance Science, Technology and Information Technology, 8 (6), 2538-2546.
15. Wonoputri, V., Subiantoro, Kresnowati, MTAP., **Purwadi, R.** (2018) Solid State Fermentation Parameters Effect on Cellulase Production from Empty Fruit Bunch, Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis 13 (3), 553-559.
16. Rinanti, A., **Purwadi, R.** (2019) The potential of tropical microalgae as flocculant in harvesting process, International Journal of GEOMATE, 16 (56), 165-170.
17. Rinanti, A., **Purwadi, R.** (2019) Increasing carbohydrate and lipid productivity in tropical microalgae biomass as a sustainable biofuel feed stock, Energy Procedia, 158, 1215-1222.
18. Sangian, H.F., Aruan, I., Tamuntuan, G.H., Bobanto, M.D., Sadjab, B.A., **Purwadi, R.**, Zulfazri, Masinambow, V.A., Gunawan, S. (2019) A Comparative Study of the Structure, Crystalinities, Miller Indices, Crystal Parameters, and Particle Sizes of Microwave- and Saline Water-Treated Cassava Starch, Bioresources, 14 (4), 8212-8228.
19. Neonufa, G.F., Pratiwi, M., Prakoso, T., **Purwadi, R.**, Soerawidjaja, TH. (2019) Catalytic thermal decarboxylation of palm kernel oil basic soap into drop-in fuel, MATEC Web of Conference 268, 06014.
20. Neonufa, GF., Pratiwi, M., Istiyami, AN., Purpawiningtiyas, E., Elizabeth, L., **Purwadi, R.** (2019) Investigation of CA/Mg/Zn metal mixing ratio for production of soap with high alkali content, International Journal of Chemical Engineering and Applications, 10 (5) 149-153.
21. Istiyami, A.N, **Purwadi, R.**, Kresnowati, M.T.A.P, Prakoso, T., Soerawidjaja, T.H., (2019) Performance of Free and Immobilized Frangipani (Plumeria Rubra) Latex Lipase in Palm Oil Lipolysis, International Journal of Technology, 10 (3), 463-471.
22. Anggraini, I.D., Keryanti, Kresnowati, M.T.A.P., **Purwadi, R.**, Noda, R., Watanabe, T., Setiadi, T., (2019) Bioethanol Production via Syngas

- Fermentation of *Clostridium Ljungdahlii* in a Hollow Fiber Membrane Supported Bioreactor, *International Journal of Technology*, 10 (3), 481-490.
23. Pratiwi, M., Muraza, O., Neonufa, G.F., **Purwadi, R.**, Prakoso, T., Soerawidjaja, T.H. (2019) Production of Sustainable Diesel via Decarboxylation of Palm Stearin Basic Soaps, *Energy and Fuels*, 33 (11), 11648-11654.
 24. Julian, H., Yaohanny, F., Devina, A., **Purwadi, R.**, Wenten, I.G. (2020) Apple juice concentration using submerged direct contact membrane distillation (SDCMD), *Journal of Food Engineering*, 272, 109807.
 25. Ruya, P.M., **Purwadi, R.**, Lim, S.S (2020) Supercritical water gasification of sewage sludge for power generation – thermodynamic study on auto-thermal operation using Aspen Plus, *Energy Conversion and Management*, 206, 112458.
 26. Ruya, P.M., Lim S.S., **Purwadi, R.**, Zunita, M. (2020) Sustainable hydrogen production from oil palm derived waste through autothermal operation of supercritical water gasification system, *Energy*, 208, 118280
 27. Elizabeth, L., Neonufa, G.F., Puspawiningtiyas, E., Pratiwi, M., Istiyami, A.N., **Purwadi, R.**, Soerawidjaja, T.H. (2021) Comparison of liquid product characteristics of PFAD metal soap decarboxylation by batch and continuous process, *Journal Engineering, Technology and Science*, 53 (3), 210311.
 28. Widodo, A., Yaswari, Y., Mariyana, R., Arif, A.F., Prakoso, T., Adhi, T.P., Soerawidjaja, T.H., **Purwadi, R.**, Indarto, A. (2021) The promising performance of manganese gluconate as a liquid redox sulfur recovery agent against oxidative degradation, *Heliyon*, 7 (4) e06743.
 29. Puspawiningtiyas, E., Pratiwi, M., **Purwadi, R.**, Istiyami, A.N., Elizabeth, L., Prakoso, T., Subagjo, Soerawidjaja, T.H. (2021) The effect of Ca/Mg/Zn mixing ratio on the research octane number of bio-gasoline during basic soap pyrolysis, *Heliyon*, 7 (11) e08314.
 30. Setyaningrum, S., Patinvoh, R.J., **Purwadi, R.**, Taherzadeh, M.J., (2021) Evaluation of biological degraded keratin for biogas production using dry anaerobic digestion system, *International Journal Applied Technology Research*, 2 (2) 81-89.
 31. Sangian, H.F., Paendong, M.P., Rombang, J.R., Lametige, J., Pasau, G., Bobanto, M., **Purwadi, R.**, Thahir, R., Sadjab, B.A., Masinambow, V.A.J., Sriana, T., Furqon, Z., Agnesty, S.Y., Widjaja, A. (2022) Study of aqueous ethanol-diesel-biodiesel prepared by near-isochoric sub-critical trans-

- esterification, WSEAS Transactions on Environment and Development, (18) 405-416.
32. Elizabeth, L, **Purwadi, R.**, Soerawidjaja, T.H. (2022) Delignification of oil palm empty fruit bunch under mild condition by air oxygen and manganese gluconate, *Issues of Chemistry & Chemical Technology*, 4 (7)
 33. Sangian, H.F., Pasau, G., Tamuntuan, G.H., Widjaja, A., **Purwadi, R.**, Agnesty, S.Y., Sriana, T., Nurrahman, A., Tuhuloula, A., Thahir, R. (2023) Analysis of compositions and fuel specifications of the aqueous emulsion fuels of gasoline (RON 90)-ethanol water in stable emulsions at low temperatures, *Eastern European Journal Enterprise Technologies*, 6 (121)
 34. **Purwadi, R.**, Ginting, D.A., Anbibie, Mohtar, WHMW, Ramli, Y., Indarto, A., (2023) Effects of nutrients on the performance of the biological surfur recovery unit for sulfur removal from water, *Water*, 3 (15) 530.
 35. Zakaria, N, Rohani, R, Mohtar, WHMW, **Purwadi, R.**, Sumapouw, GA, (2023) Indarto, A., Batik effluent treatment and decolonization - a review, *Water* 7 (15) 1339.
 36. Sangian, H.F., Lestari, D., Pasau, G, Tamuntuan, G.H., Widjaja, A., **Purwadi, R.**, Agnesty, S.Y., Sadjab, B, Sangian, M.C., Thahir, R. (2023) Identifying of the compositions of the blended fuels of the butanol, gasoline, and water stabilized at low temperatures, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (124).
 37. Adiandri, R.S, **Purwadi, R.**, Hoerudin, Setiadi, T. (2023) Evaluation of biosurfactant production by *Bacillus* species using glucose and xylose as carbon soruces, *Current Microbiology*, 8 (80), 250.
 38. Fatihah, A.N.N, Pratiwi, M., Istiyami, A.N, **Purwadi, R.**, Lestari, D. (2023) Investigation of process variable effects on palm kernelamidopropyl betaine production, *Tenside Surfactants Detergents*, 5 (60) 419-425.
 39. Bindar, Y., Steven, S., Kresno, S.W., Hernowo, P, Retiawaty, E., **Purwadi, R.**, Prakoso, T. (2024) Large-scale pyrolysis of oil palm frond using two-box chamber pyrolyzer for cleaner biochar production, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 5 (14) 6421-6434.
 40. Shofinita, D., Lestari, D., **Purwadi, R.**, Sumampouw, G.A., Gunawan, K.C., Ambarwati, S.A., Achmadi, A.B., Tjahjadi, J.T., (2024) Effects of different decaffeination methods on caffeine contents, physicochemical, and sensory properties of coffee, *International Journal of Food Engineering*, 8 (20) 561-581.

JURNAL NASIONAL

1. Kresnowati, MTAP., Fitriana, H.N., **Purwadi, R.** (2017) Pemetaan Pengaruh Proses Pengolahan pada Kualitas Biji Kakao Menggunakan Metoda Metabolik Profiling dengan GC/MS, Reaktor, 17 (3), 132-138.
2. **Purwadi, R.**, Nicko, N., Stephanie, P. (2018) Optimisasi temperatur udara pengering dan laju alir umpan pada proses pengeringan ragi roti, Jurnal Teknik Kimia Indonesia, 8 (1) 1-5.
3. **Purwadi, R.**, Kresnowati, MTAP, Badriyah, L., Puri AAD., Aisyah, R. (2018) Pemanfaatan gliserol sebagai limbah biodiesel melalui proses biologik 1: pemilihan mikroba, Jurnal Teknik Kimia Indonesia, 12 (1) 213-221.
4. Ibrahim, A.R, Sangian, H.F., Mosey, HIR, **Purwadi, R.** (2019) Pemanfaatan nira aren menjadi bioetanol untuk bahan bakar emulsi yang ramah lingkungan, Pharmacon, 8 (4) 895-903.
5. Darojati, H.A., **Purwadi, R.**, Rasrendra, C.B. (2020) Proses fraksionasi biomassa dari tandan kosong kelapa sawit melalui metoda organosolv etanol dengan penambahan katalis, Jurnal Selulosa, 10 (2) 73-80.
6. **Purwadi, R.**, Wonoputri, V., Fitriana, F.U., Choliq, N.S. (2021) Variasi antioksidan dalam pembuatan protected active dried yeast, Jurnal Teknik Kimia Indonesia, 19 (1) 1-9.

PROCEEDING SEMINAR INTERNASIONAL

1. **Purwadi, R.**, Niklasson, C., Taherzadeh, M.J. (2002), Control and Monitoring of a Bioreactor System for Ethanol Production from Lignocellulosic Hydrolyzate, International Conference on Trends in Monitoring and Control of Life Science Applications, Oct 7-8, 2002, Lyngby, Denmark.
2. **Purwadi, R.**, Millati, R., Taherzadeh MJ., 2002, " Detoxification of Dillute-Acid Hydrolysates by Overliming", Ethanol Conference, Oct 15-16, 2002, Säröhus, Göteborg.
3. **Purwadi, R.**, Taherzadeh, M.J.(2006) Continuous detoxification of dilute-acid hydrolyzates by Ca(OH)₂, 28th Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals, April 30 – May 3, 2006, Nashville, TN.
4. **Purwadi, R.**, Krisna, A., Winoto, H.P., Simultaneous amylase production and starch hydrolysis by immobilized *Aspergillus niger* in continuous column bioreactor, Poster presentation in Regional Symposium of Chemical Engineering, December 5-6, 2007, Yogyakarta.

5. **Ronny Purwadi**, Zulhaj Rizky dan Fleuri Paramita Aprianti, "Cabbage Extract as a Precursor in Xanthan Gum Production using *Xanthomonas campestris*", Proceeding of 16th Asean Regional Symposium on Chemical Engineering 2009, Manila, 1-2 December 2009, University of Santo Tomas, Filipine.
6. Andi, **Ronny Purwadi**, M.T.A.P. Kresnowati and Tjandra Setiadi, "Conversion of Waste form Biodiesel Industry into Valuable Products: an Initial Step to Biorefinery", Proceedings International Conference on Biotechnology, DIESEMAS ITB, 15-16 June 2009.
7. **Ronny Purwadi**, Toshihiro Hirotsu and Shinichi Goto, Study of pHe measurement of fuel-ethanol, Conference of Asia Biomass Energy Promotion Activity in 2009, Tokyo, March 22nd, 2010.
8. Silvi Octavia, Ilona Sarvari Horwath, Tatang H. Soerawidjaja, **Ronny Purwadi**, IDG Arsa Putrawan, Enhancement of Enzymatic Hydrolysis of Oil Palm Empty Fruit Bunches by Decreasing Cellulose Crystallinity Index, The 1st International Seminar on Fundamental and Application of Chemical Engineering (ISFACHE), Bali – Indonesia, 3-4 November 2010.
9. Silvi Octavia, Ilona Sarvari Horwath, Tatang H. Soerawidjaja, **Ronny Purwadi**, IDG Arsa Putrawan, Fractionation of Sweet Sorghum Bagasse to Enhance the Enzymatic Digestibility, Proceeding of 17th Asean Regional Symposium on Chemical Engineering, Bangkok – Thailand, 22-23 November, 2010.
10. **Ronny Purwadi**, The characteristic of dried solid-waste produced from cassava based bioethanol industry, Proceeding of The 4th AUN/SEED-Net Regional Conference on Biotechnology: Emerging Technology for Green Engineering, Bangkok - Thailand, 26-27 January, 2012.
11. Zilfahmiati, **Ronny Purwadi**, Comparison between Multi-culture Fermentation Method and Series in Bioethanol Production using *Saccharomyces cerevisiae* and *P. pastoris* GS115 mut+, the 19th Regional Symposium on Chemical Engineering: Strengthening the role of ASEAN chemical engineers in the world economy dynamics, Bali, Indonesia – November 7-8, 2012.
12. **Ronny Purwadi**, Toshihiro Hirotsu, Shinichi Goto, Study of pHe measurement of fuel-ethanol, Proceeding of The 5th AUN/SEED-Net Regional Conference on Chemical Engineering: Moving towards a New Chapter in Chemical Engineering amongst ASEAN Region, Pattaya – Thailand, 7-8 February, 2013

13. Irika Devi Anggraini, Annisa Mienda C. Made Santihayu Sukma, **Ronny Purwadi**, Initial Study of Continuous Butanol Production By Cell-Entrapment Clostridium saccharobutylicum NRLL B643 in Ca-alginate, The 22nd Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE) 2015: Embracing the Opening of AEC Incorporating with Education, Research, and Industries in Chemical Engineering, Bangkok, Thailand – September 24-25, 2015
14. Neonufa, G.F., Pratiwi, M., **Purwadi, R.**, Prakoso, T., Soerawidjaja, T.H., Elizabeth, L. (2019) Production and Characterization of the Basic Soap Obtained by Double Decomposition and Direct Process of Palm Stearin Oils, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 543, 012069.
15. Neonufa, GF., Pratiwi, M., Puspawiningtiyas, E., **Purwadi, R.**, Elizabeth, L. (2020) Biohydrocarbon production for jet fuel from palm oil derivative products, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 823 (1) 012029.
16. Puspawiningtiyas, E., Pratiwi, M., Neonufa, G.F., **Purwadi, R.**, Istiyami, A.N., Elizabeth, L, Soerawidjaja, T.H., Prakoso, T. (2020) Effect of metal type on basic soap pyrolysis produce bio-gasoline, IOP Conference Series: Material Science and Engineering 823 (1) 012027.
17. Mariyana, R., Choliq, A.A., Rahmanto, K.A., Nugroho, Y., **Purwadi, R.**, Kresnowati, MTAP, Septiningrum, K., Frans, B.M.D (2021) Integrated biorefinery technology: Monetization of oil palm empty fruit bunch to biofuel & biobased chemical, and beyond, IOP Conference Series: Material Science and Engineering, 1143, 012053.
18. **Purwadi, R.**, Lestari, D., Lohoo, C.A., Tirtaadji, J.L. (2021) The effect of size and solid content in hydrolysis of sweet potato starch using endogenous beta-amylase enzymes, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1143 (1) 012043.
19. Adiandri, R.S., **Purwadi, R.**, Setiadi, T. (2021) Estimation of the biomass yield and stoichiometric coefficient during bioproduct formation through thermodynamic approach: a case study of biosurfactant production, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1143 (1) 012016.
20. **Purwadi, R.**, Teguh, C.F., Mazaya, D. (2021) Fermented cassava as an alternative flour for pasta noodle, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1143 (1) 012042.

21. Sangian, H.F., Manialup, B.H., As'ari, A., Ibrahiim AR, Rombang, JR, Lametige, JA., Mosey, HIR, Tanauma, A., Pasau, G., Tongkukut, SHJ, **Purwadi, R.**, Neonufa, GF., Rorong, JA., Sangi, MM., Gunawan, S, Widjaja, A, Tuhuloula, A., Thahir, R., Sadjab, BA, Masinambow, VAJ, Sriana, T., Furqon, Z, Agnesty, SY, Rondnuwu, SB. (2021) Analysis of water-ethanol-gasoline (RON 88) composition in one phase substance using triangular graph, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1115 (1) 012050.

PROSIDING SEMINAR NASIONAL

1. Tatang H. Soerawidjaja, IGBN Makertihartha, **Ronny Purwadi**, (1988) “Penyepakatan Data Proses: Langkah Pertama dalam Evaluasi Kinerja Proses”, Prosiding Konvensi V BKK-PIL.
2. **Ronny Purwadi**, IGBN Makertihartha (1989) “Strategi Optimisasi Sistem Kukus”, Warta Insinyur Kimia.
3. Tatang H. Soerawidjaja, **Ronny Purwadi** (1989) “Kesetimbangan Sistem Uap-Cair NH₃-H₂O-H₂-N₂-Ar-CH₄”, Prosiding Aplikasi Analisis Termodinamika untuk Sistem Proses dan Termal – PAU Rekayasa ITB.
4. Tri Partono Adhi, **Ronny Purwadi** (1992) “Buku Manual untuk program: Optimisasi Operasi Fedbatch untuk Produksi Penisilin”, Laporan Proyek PAU-Bioteknologi ITB
5. **Ronny Purwadi** (1995) “Targeting perpindahan panas untuk sistem pertukaran panas”, Warta Insinyur Kimia vol. 7 no. 3.
6. **Ronny Purwadi** (1995) “Kinetik dan Mekanisme Reaksi Penisilin Asilase oleh Bacillus megaterium”, Prosiding Seminar Teknik Kimia Soehadi Reksowardojo – ITB 1995.
7. **Ronny Purwadi** (1997) “Seleksi Perangkat Lunak Simulasi Teknik Kimia”, Prosiding Seminar Teknik Kimia Soehadi Reksowardojo (ISSN-0854-7769).
8. **Ronny Purwadi**, Tri Partono Adhi (1997) “Analisis Teoretik tentang Aplikasi Elektroforesis di dalam Meningkatkan Kinerja Bioreaktor Membran untuk Reaksi Enzimatik”, Prosiding Seminar Fundamental dan Aplikasi Teknik Kimia – ITS Surabaya (ISSN-1410-5667).
9. Chrismono Himawan, **Ronny Purwadi** (1998) “Simulasi berbasis komputer untuk pendidikan teknik kimia”, Prosiding Seminar Fundamental dan Aplikasi Teknik Kimia – ITS Surabaya (ISSN-1410-5667).
10. **Purwadi, R.**, Taherzadeh, M.J. (2006) Produksi Etanol dari Bahan-bahan Lignoselulosa: Detoksifikasi dan Strategi Fermentasi, Pertemuan Nasional

Insinyur Kimia Indonesia 2006, 16-17 November 2006, Kampus UGM – Yogyakarta.

11. **Purwadi, R.**, Kresnowati, M.T.A.P., Puri, A.A.D., Aisyah, R. (2008) Pengolahan gliserol, limbah biodiesel, menjadi produk bermanfaat melalui proses biologis, Seminar Nasional Fundamental dan Aplikasi Teknik Kimia 2008, 5 November 2008, Kampus ITS – Surabaya.
12. **Purwadi, R.**, Nicko, Stephanie, P. (2008) Produksi ragi roti kering: pengaruh temperatur udara pengering dan laju alir umpan terhadap vitalitas dan viabilitas ragi, Seminar Nasional Fundamental dan Aplikasi Teknik Kimia 2008, 5 November 2008, Kampus ITS – Surabaya.
13. Andi, **Purwadi, R.**, Kresnowati, M.T.A.P., Setiadi, T., Pengolahan Limbah Industri Biodiesel Menjadi Produk Bernilai: Langkah Awal Menuju Biorefinery, Seminar – Biomass Utilization For Alternative Energy And Chemicals, Universitas Katolik Parahyangan, 23-24 April 2009 - Bandung.
14. **Ronny Purwadi**, Chris Amanta, Noni Lo Lan, "Pengaruh C/N dan Laju Reaksi terhadap Produksi Enzim Amilase Menggunakan *Aspergillus niger*", Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia 2009, Bandung, 19-20 Oktober 2009, Asosiasi Pendidikan Tinggi Teknik Kimia Indonesia (Aptekindo) ISBN: 978-979-98300-1-2
15. Silvi Octavia, Tatang Hernas Soerawidjaja, **Ronny Purwadi**, "Efektivitas Kombinasi Proses Perendaman dengan Amoniak dan Asam pada Pengolahan Awal Biomassa sebagai Bahan Mentah Pembuatan Bioetanol", Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia 2009, Bandung, 19-20 Oktober 2009, Asosiasi Pendidikan Tinggi Teknik Kimia Indonesia (Aptekindo) ISBN: 978-979-98300-1-2
16. Andi, **Ronny Purwadi**, Tjandra Setiadi dan M.T.A.P. Kresnowati, "Pengolahan Limbah Industri Biodiesel Menjadi Produk Bernilai: Langkah Awal Menuju Biorefinery", Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia 2009 - Biomass Utilization for Alternative Energy and Chemicals, Bandung, 23-24 April 2009, Universitas Katolik Parahyangan (ISBN: 978-979-98465-5-6)
17. **Ronny Purwadi** dan Hanny Lim, Ekstrak Singkong sebagai Substrat pada Produksi Xanthan Gum Menggunakan *Xanthomonas campestris*, Prosiding Seminar Teknik Kimia Soehadi Reksowardojo 2010, Bandung, 25-26 Oktober 2010, Institut Teknologi Bandung.
18. Octavia, S., Soerawidjaja, T.H., **Purwadi, R.**, Putrawan, IDGA. (2011) Pengolahan Awal Lignoselulosa Menggunakan Amoniak Untuk

Meningkatkan Perolehan Gula Fermentasi, Prosiding Seminar Teknik Kimia “Kejuangan”, Yogyakarta, 22 Februari 2011.

19. **Ronny Purwadi** dan Edrick San, Produksi Biogas dari Sampah Rumah Tangga dengan Gliserol sebagai Co-substrat, Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia dan Musyawarah APTEKINDO 2012: The Challenge of Chemical Engineering Institutions in Product Innovation for a Sustainable Future, Dept. Teknik Kimia Universitas Indonesia, Depok, 20-21 September 2012.
20. **Ronny Purwadi**, C.B. Rasrendra, E. Restiawati, M.S. Sukma, A.M. Chintyarani (2015) Pengembangan Metoda Kultivasi Solventogenic clostridia untuk Proses Produksi Biobutanol, Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia 2015, Yogyakarta, 12-13 Oktober 2015.
21. Rinanti, A., **Purwadi, R.** (2018) Pemanfaatan mikroalga blooming dalam produksi bioethanol tanpa proses hidrolisis, Seminar Nasional Kota Berkelanjutan 1 (1) 281-292.

VII. PENGHARGAAN

1. Satyalancana Karya Satya 10 tahun, Republik Indonesia, 2000.
2. Penerima Beasiswa Proyek QUE TK-ITB, 2002-2004.
3. Penerima Beasiswa dari Chalmers Univ. of Technology, 2004-2005.
4. Penerima Beasiswa dari University College of Borås, 2005-2006.
5. Poster terbaik dalam 16th Asean Regional Symposium on Chemical Engineering 2009, Manila, 1-2 December 2009, University of Santo Tomas, Filipine.
6. Satyalancana Karya Satya 20 tahun, Republik Indonesia, 2014
7. Penghargaan 25 tahun ITB, Rektor ITB, 2016
8. Satyalancana Karya Satya 30 tahun, Republik Indonesia, 2022

VIII. SERTIFIKASI

1. Sertifikasi Dosen, Departemen Pendidikan Nasional, 2011
2. Sertifikasi Insinyur, Persatuan Insinyur Indonesia, 2017
3. Sertifikasi Internal Auditor ISO22000:2018 Food Safety Management System, 2023.



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎️ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉️ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id [FgbItb](#) [FGB_ITB](#)
 [@fgbitb_1920](#) [Forum Guru Besar ITB](#)

ISBN 978-623-297-583-5

