

PENGEMBANGAN BIOETANOL GENERASI KEDUA DI INDONESIA: TANTANGAN DAN HARAPAN

Jasman

Program Studi Pendidikan Kimia FKIP Universitas Nusa Cendana

Jl. Adisucipto, Kupang

ABSTRAK

Bioethanol telah digunakan sebagai bahan bakar alternatif di berbagai negara sebagai sumber energi terbarukan (renewable energy) yang ramah lingkungan. Bioethanol adalah etil alcohol yang dihasilkan dari fermentasi bahan hayati yang mengandung karbohidrat, baik monosakarida maupun polisakarida. Produksi bioethanol dari bahan dengan kandungan monosakarida dan polisakarida dalam bentuk pati (bioethanol generasi pertama) dapat dilakukan dengan mudah tetapi hal ini dapat mengancam ketersediaan bahan pangan bagi umat manusia karena bahan yang digunakan merupakan bahan makanan bagi manusia. Pada sisi yang lain produksi bioethanol dari polisakarida dalam bentuk selulosa (bioethanol generasi kedua) memiliki potensi yang besar karena bahan bakunya melimpah, murah, dan tidak digunakan sebagai bahan makanan bagi manusia. Akan tetapi proses produksi bioethanol generasi kedua ini menghadapi tantangan yang berat berupa hadirnya senyawa lignin yang berkombinasi sedemikian dengan selulosa dan hemiselulosa (lignoselulosa) yang sulit diuraikan sehingga proses konversi selulosa maupun hemiselulosa menjadi etanol terhambat. Teknologi untuk mengatasi hambatan ini telah muncul dalam berbagai teknik *pretreatment*, namun masih memerlukan biaya yang cukup besar. Ada harapan baru untuk mengatasi kendala ini yaitu dengan ditemukannya enzim-enzim misalnya *laccase* dari beberapa jenis jamur misalnya jamur akar putih yang mampu mengurai lignin yang terdapat dalam bahan baku lignoselulosa. Upaya pengembangan teknologi *pretreatment* berbasis enzim pendegradasi lignin ini dapat menjadi satu peluang yang dapat dikaji untuk produksi bioethanol generasi kedua dengan ongkos yang terjangkau.

Kata kunci : bioethanol generasi kedua, energi terbarukan, lignoselulosa, *pretreatment*, enzim pendegradasi lignin.

ABSTRACT

Bioethanol has been used as an alternative fuel in various countries as an environmentally friendly source of renewable energy. Bioethanol is ethyl alcohol produced from the fermentation of biological materials containing carbohydrates, both monosaccharides and polysaccharides. The production of bioethanol from materials containing monosaccharides and polysaccharides in the form of starch (first generation bioethanol) can be done easily but this can threaten the availability of food for mankind because the materials used are food ingredients for humans. On the other hand, the production of bioethanol from polysaccharides in the form of cellulose (second generation bioethanol) has great potential because the raw material is abundant, cheap, and not used as food for humans. However, the second generation bioethanol production process faces a formidable challenge in the form of the presence of lignin compounds which combine in such a way with cellulose and hemicellulose (lignocellulose) which are difficult to decompose so that the conversion process of cellulose and hemicellulose into ethanol is hampered. Technology to overcome this obstacle has emerged in various pretreatment techniques, but still requires a large amount of money. There is a new hope for overcoming this obstacle, namely the discovery of enzymes such as laccase

from several types of fungi such as white root fungi which are able to break down lignin contained in lignocellulosic raw materials. Efforts to develop pretreatment technology based on lignin degrading enzymes can be an opportunity that can be studied for the production of second generation bioethanol at an affordable cost.

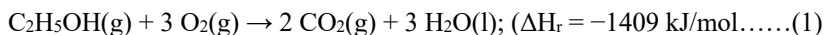
Keyword: *second generation bioethanol, renewable energy, lignocellulosic, pretreatment, lignin degrading enzymes.*

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan sumber energi dari waktu ke waktu makin meningkat seiring dengan penambahan populasi manusia, perkembangan ekonomi, industry, dan transportasi. Sebagai contoh, konsumsi bahan bakar minyak di Indonesia pada tahun 2010 adalah 62.187.080,37 kilo liter meningkat menjadi 70.744.977,00 kilo liter pada tahun 2014 [1]. Konsumsi energi final tahun 2020 (tanpa biomasa) sebesar 118,3 juta TOE sedangkan pada tahun 2018, baru mencapai 114 juta TOE [2]. Khusus untuk Indonesia, seiring dengan bertambahnya kebutuhan energi, sumber energi fosil yang selama bertahun-tahun diandalkan justru makin berkurang, bahkan saat ini Indonesia sudah menjadi negara pengimpor sumber energi fosil tersebut dalam bentuk minyak. Berdasarkan pantauan Tim Riset CNBC Indonesia, negara Indonesia ternyata sudah menjadi net importir hasil minyak (termasuk Bahan Bakar Minyak /BBM) sejak tahun 1997. Pada periode tersebut, untuk pertama kalinya volume impor hasil minyak Indonesia sebesar 11,75 juta ton (setara 94,33 juta barel minyak), melampaui volume ekspornya sebesar 10,22 juta ton (setara 82,07 juta barel minyak) [3].

Urgensi penggunaan bioethanol sebagai salah satu jenis bahan bakar bukan hanya karena berkurangnya sumber energi fosil, tetapi juga karena bioethanol merupakan bahan bakar yang ramah lingkungan (rendah emisi). Sebagaimana kita ketahui bahwa saat ini telah terjadi perubahan iklim yang mengancam ekosistem kita di bumi ini. Salah satu faktor yang diduga keras menjadi penyebabnya adalah tingginya gas rumah kaca di atmosfer yang disebabkan oleh emisi akibat penggunaan energi fosil sebagai bahan bakar [4].

Selama pembakaran, etanol bereaksi dengan oksigen menghasilkan karbondioksida, air, dan panas melalui reaksi:



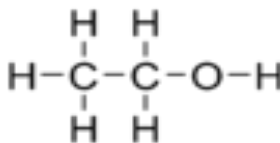
Panas yang dihasilkan dari pembakaran etanol digunakan untuk menggerakkan piston di dalam mesin melalui ekspansi gas panas [5].

Bahan baku untuk pembuatan bioethanol dapat dikelompokkan menjadi: (1) bahan yang mengandung gula sederhana (monosakarida dan disakarida) misalnya nira tebu dan nira sorgum manis (*sweet sorghum*); (2) bahan yang mengandung pati (*starchy material*) misalnya singkong dan jagung; (3) bahan yang mengandung serat atau selulosa dan lignin (*lignocellulosa*) seperti jerami padi, serpihan kayu, dan rumput-rumputan [6].

Bioethanol dapat dihasilkan dari fermentasi gula atau bahan lignocellulosa setelah konversi ke mono atau disakarida, banyak bentuk gula dapat diekstraksi dari tanaman dengan pretreatment yang berbeda seperti perlakuan termal, perlakuan kimia, dan proses iradiasi [7]. Dari sudut pandang ekonomi penggunaan residu lignocellulosa dari tanaman atau produk makanan sebagai bahan baku memiliki lebih banyak keunggulan dibandingkan dengan gula atau pati, jumlah gula atau pati yang tinggi dalam jagung dan tebu dapat dengan mudah difermentasi menjadi bioethanol [8]. Akan tetapi, konversi bahan lignocellulosa menjadi biofuel membutuhkan lebih banyak pra-perawatan sebelum dicerna karena metode pretreatment memiliki dampak yang signifikan pada produksi yang efektif dari etanol dari biomassa, bagaimanapun, penelitian intensif masih diperlukan untuk mengembangkan yang baru dan lebih efisien proses pengolahan untuk mengubah biomassa lignocellulosa menjadi etanol [9].

2. Bioethanol sebagai sumber energi baru terbarukan

Etanol adalah senyawa golongan alkohol dengan rumus kimia C_2H_5OH dan rumus strukturnya dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Rumus struktur etanol [5]

Residu etanol yang ditemukan pada peninggalan keramik yang berumur 9000 tahun dari Cina bagian utara menunjukkan bahwa minuman beralkohol telah digunakan manusia prasejarah dari masa neolitik (Roach, 2005). Etanol absolut mempunyai massa molar $46,07 \text{ g.mol}^{-1}$, kerapatan $0,789 \text{ g.ml}^{-1}$, dan titik didih $78,4^{\circ}\text{C}$. Etanol merupakan senyawa organik yang berwujud cair pada suhu kamar, jernih, tak berwarna, beraroma khas, mudah menguap dan mudah terbakar. Etanol dapat ditemukan pada banyak produk makanan dan minuman seperti tape, brem, wine, anggur, dan lain-lain. Selain pada produk makanan dan minuman, etanol banyak digunakan sebagai pelarut, germisida, zat anti beku, bahan bakar, dan bahan baku pada pembuatan berbagai senyawa kimia lainnya [5].

Bioetanol banyak digunakan di sektor transportasi sebagai penyusun campuran dengan bensin atau sebagai penambah oktan (etil .) tersier butil eter (ETBE), terdiri dari 45% per volume bioetanol dan 55% per volume isobutilena). Banyak negara menggunakan ETBE sebagai pengganti metil tersier butil eter (MTBE), yang berfungsi untuk meningkatkan angka oktan, tetapi dilarang di AS dan Kanada karena emisi kanker. Bioetanol dicampur dengan bensin pada fraksi volume 5, 10 dan 85 % (nama bahan bakar E5-E85). Sebanyak 85 % bioetanol volume hanya dapat digunakan pada kendaraan berbahan bakar fleksibel (FFV), sedangkan campuran 5 dan 10 % volume dapat digunakan tanpa modifikasi mesin. Namun, masalah yang terkait dengan penggunaan bioetanol adalah: efek korosif pada injektor bahan bakar dan pompa bahan bakar listrik (bioetanol bersifat higroskopis), masalah startup mesin dalam kondisi cuaca dingin (etanol murni sulit menguap) dan efek tribologis pada sifat pelumas dan performa mesin. Bioetanol di dalam pelumas berkurang secara signifikan [10].

Bio-etanol adalah etil alkohol, alkohol biji-bijian, atau secara kimia $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ atau EtOH . Campuran bio-etanol dan bio-etanol/bensin memiliki sejarah panjang sebagai bahan bakar transportasi alternatif. Sudah digunakan di Jerman dan Prancis pada awal tahun 1894 pada saat itu industri mesin pembakaran internal. Brazil telah memanfaatkan bioetanol sebagai bahan bakar transportasi sejak tahun 1925 bio-etanol untuk bahan bakar tersebar luas di Eropa dan Amerika Serikat sampai awal 1900-an. Karena menjadi lebih mahal untuk menghasilkan dari bahan bakar berbasis minyak bumi, terutama setelah Dunia Perang II, potensi bio-etanol sebagian besar diabaikan sampai krisis minyak tahun 1970-an. Sejak tahun 1980-an, telah terjadi peningkatan minat penggunaan bioetanol sebagai transportasi alternatif bahan bakar. Negara-negara termasuk Brasil dan Amerika Serikat telah lama mempromosikan produksi bio-etanol dalam negeri. Selain alasan energi, campuran bio-etanol/bensin di Amerika Serikat dipromosikan sebagai praktik berbasis lingkungan, awalnya sebagai penambah oktan untuk menggantikan timbal. Bio-etanol juga memiliki nilai sebagai mengoksigenasi dalam bensin yang terbakar bersih untuk mengurangi knalpot kendaraan emisi [6].

Bio-etanol memiliki angka oktan yang lebih tinggi (108) dibanding bensin (88), batas mudah terbakar yang lebih luas, kecepatan nyala yang lebih tinggi dan panas penguapan yang lebih tinggi. Properti ini memungkinkan rasio kompresi yang lebih tinggi dan lebih pendek membakar waktu, yang mengarah pada keuntungan efisiensi teoritis dibandingkan bensin dalam mesin IC. Bilangan oktan adalah ukuran kualitas bensin untuk pencegahan pengapian dini, yang mengarah untuk ketukan silinder. Bahan bakar dengan angka oktan yang lebih tinggi adalah lebih disukai pada mesin pembakaran dalam dengan penyalan percikan. Bahan bakar oksigenat seperti bio-etanol memberikan nilai antiknock yang masuk akal [6].

Kekurangan bio-etanol termasuk kepadatan energinya yang lebih rendah dari bensin (bio-etanol memiliki 66% energi yang bensin memiliki), korosifnya, luminositas api rendah, tekanan uap lebih rendah (membuat awal dingin menjadi sulit), dapat bercampur dengan air, toksisitas terhadap ekosistem [11], peningkatan emisi gas buang asetaldehida dan peningkatan tekanan uap (dan emisi evaporatif) Ketika pencampuran dengan bensin. Beberapa sifat bahan bakar alkohol ditampilkan pada Tabel 1.

Bio-etanol dapat digunakan dalam berbagai metode sebagai transportasi bahan bakar. Bisa langsung digunakan sebagai bahan bakar transportasi atau bisa juga dicampur dengan bensin. Bio-etanol dapat dicampur dengan bensin itu menggantikan dan dapat dibakar di mesin pembakaran tradisional tanpa modifikasi yang diperlukan. Bio-etanol paling banyak umumnya dicampur dengan bensin dalam konsentrasi 10% bio-etanol hingga 90% bensin, yang dikenal sebagai E10 dan dijuluki "gasohol". Di Brasil, bahan bakar bio-etanol digunakan murni atau dicampur dengan bensin dalam campuran yang disebut gasohol (24% bio-etanol dan 76% bensin) [6]. Bio-etanol dapat digunakan sebagai campuran 5% dengan bensin di bawah UE standar kualitas EN 228. Campuran ini tidak memerlukan modifikasi mesin dan dilindungi oleh garansi kendaraan. Dengan modifikasi mesin, bioetanol dapat digunakan pada tingkat yang lebih tinggi, misalnya E85 (85% bio-etanol) [6]. Bio-etanol adalah bahan bakar beroksigen yang mengandung 35% oksigen, yang mengurangi emisi partikulat dan nitrogen oksida (NO_x) dari pembakaran. Menggunakan bahan bakar campuran bio-etanol untuk mobil dapat secara signifikan mengurangi penggunaan minyak bumi dan membuang rumah kaca emisi gas. Menambahkan bio-etanol ke bensin meningkatkan kandungan oksigen bahan bakar, meningkatkan pembakaran bensin dan mengurangi emisi gas buang yang biasanya disebabkan oleh pembakaran yang tidak sempurna pada kendaraan bermotor, seperti CO dan yang tidak terbakar hidrokarbon [6].

3. Potensi bahan baku bioethanol generasi kedua di Indonesia

Umumnya, bioethanol generasi kedua dan selanjutnya dari biofuel termasuk bioetanol tidak bersaing dengan pasokan makanan karena mereka didasarkan pada bahan baku non-makanan [10]. Bioetanol generasi kedua biasanya dihasilkan dari biomassa lignoselulosa, tetapi juga dimungkinkan untuk menggunakan produk sampingan industri, seperti sebagai whey atau gliserol mentah, sebagai bahan baku. biomassa tersebut adalah biasanya relatif murah serta tersedia secara lokal. Lignoselulosa dianggap sebagai sumber karbon terbarukan dan berkelanjutan, dan terdapat di banyak bahan baku tanaman. Jumlah biomassa lignoselulosa yang tersedia tergantung pada: kondisi iklim. Konversi lignoselulosa menjadi gula pereduksi lebih sulit daripada konversi pati. Berbagai jenis biomassa tanaman telah dipertimbangkan oleh para peneliti untuk digunakan dalam produksi biofuel (Gambar. 1). Ini termasuk tanaman energi khusus yang tumbuh di tanah berkualitas rendah (mis. tanaman herba dan rumput abadi seperti *Miscanthus sinensis* dan *M. giganteus* atau switchgrass. Limbah pertanian, seperti jerami sereal, jerami gandum, tongkol jagung, sekam padi dan ampas tebu dari pengolahan tebu juga telah diteliti sebagai sumber potensial biomassa lignoselulosa [10]. Penelitian lain berfokus pada limbah kayu berbasis hutan dan biomassa hutan (kulit kayu, serbuk gergaji, hiasan kayu lunak (pinus) dan serpihan kayu keras (ek), atau limbah dari taman dan kebun (dedaunan, rerumputan, ranting kayu[10]. Limbah industri, seperti pengeluaran bir biji-bijian dan biji-bijian bekas dari penyulingan, dan kotamadya limbah padat seperti sisa makanan, kertas kraft dan lumpur kertas mengandung selulosa juga telah dipertimbangkan [10].

Untuk konteks Indonesia, bahan baku bioethanol generasi kedua yang melimpah meliputi: jerami padi, tongkol jagung, limbah kayu, tandan kosong kelapa sawit, sekam padi, dan ampas tebu. Produksi padi pada tahun 2022 sebesar 55 670 219,00 ton gabah kering giling (GKG) [12]. Jika 1 ton GKG menghasilkan limbah Jerami rata-rata sebanyak 1,5 ton [12] maka pada produksi Jerami tahun ini mencapai kurang lebih 83,505,328.5 ton. Kandungan karbohidrat dalam jerami padi sebesar 32% [13] maka total karbohidrat dari limbah jerami padi mencapai 26,721,705.12 ton. Konversi sempurna karbohidrat (dalam bentuk lignoselulosa) menjadi etanol sebesar 50% (Saha and Cotta, 2012) maka dapat menghasilkan bioethanol murni sebanyak 13,360,852.56 ton.

Potensi bahan baku yang lain misalnya tongkol jagung, berdasarkan statistik produksi tanaman pangan Indonesia tahun 2010-2014, produksi jagung rata-rata 18.483.727 ton/tahun [14]. Limbah tongkol jagung diperkirakan sebesar 30% dari produksi jagung, sehingga jumlah tongkol jagung yang dihasilkan berdasarkan data di atas adalah 5,545,118.1 ton per tahun. Faktor konversi tongkol jagung ke bioethanol rata-rata sebesar 6,5% [15] maka angka tersebut setara dengan 360432,7 ton bioethanol per tahun.

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dihasilkan sebanyak rata-rata 6663956 ton per tahun [16] hanya dari propinsi Riau. Sementara itu daerah-daerah yang menghasilkan kelapa sawit di Indonesia cukup banyak (Tabel 1) [17]. Kandungan lignoselulosa di dalam TKKS berkisar antara 30% sampai 40% sehingga dengan factor konversi 50%, TKKS dari Riau saja dapat menghasilkan rata-rata 1166192,3 ton bioethanol per tahun.

Tabel 1. Produksi kelapa sawit menurut propinsi di Indonesia antara tahun 2017-2021

No.	Provinsi/Province					
		2017	2018	2019	2020*)	2021**)
1	Aceh	911.697	1.037.402	1.133.347	1.134.606	1.167.337
2	Sumatera Utara	5.119.497	5.737.271	5.647.313	5.776.781	5.928.612
3	Sumatera Barat	1.302.952	1.248.269	1.253.394	1.312.253	1.350.125
4	Riau	8.113.852	8.496.029	9.513.208	9.984.315	10.270.149
6	Jambi	1.849.969	2.691.270	2.884.406	3.022.565	3.109.205
7	Sumatera Selatan	3.199.481	3.793.622	4.049.156	4.267.023	4.388.731
8	Kepulauan Bangka Belitung	853.648	900.318	815.667	843.047	868.462
9	Bengkulu	893.322	1.047.729	1.032.056	1.063.404	1.093.456
10	Lampung	486.714	487.203	414.206	384.948	395.967
20	Kalimantan Barat	2.784.180	3.086.889	5.235.299	5.471.407	5.635.683
21	Kalimantan Tengah	5.778.611	7.230.094	7.664.841	7.685.770	7.920.462
22	Kalimantan Selatan	1.933.721	1.464.226	1.665.397	1.561.147	1.608.256
23	Kalimantan Timur	2.840.710	3.786.477	3.988.883	3.823.221	3.939.049

Produksi kayu Indonesia pada tahun 2020 adalah 258 435 m³ (kayu gergajian dan 3862923 m³ kayu lapis [18]. Limbah kayu pada industry penggergajian berkisar antara 20 – 32% dari total kayu yang ada (Aditya dkk., 2019). Sementara itu, kandungan lignoselulosa dalam limbah kayu adalah: fraksi polisakarida: selulosa (35–55 %), hemiselulosa (20–35 %) dan lignin (15–36 %) [19].

Selain bahan-bahan yang diuraikan di atas, masih banyak jenis biomassa lain yang potensial sebagai bahan baku bioethanol generasi kedua, misalnya rumput-rumputan, dedaunan, kertas bekas, dan ranting-ranting pohon. Indonesia sebagai negara besar dengan iklim tropis yang kaya dengan berbagai jenis tumbuhan, tentunya memiliki potensi yang sangat besar dalam hal ketersediaan bahan baku tersebut.

4. Tantangan dalam produksi bioethanol generasi kedua

Meskipun bahan baku bioethanol generasi kedua sangat berlimpah dan tentunya murah, tidak berarti begitu mudah mendapatkan keuntungan dari bahan tersebut. Hal ini terjadi karena ternyata konversi karbohidrat di dalam bahan baku lignoselulosa menjadi etanol melalui proses fermentasi tidak mudah dilakukan. Kesulitan itu pertama berkaitan dengan struktur molekul lignoselulosa. Material lignoselulosa terdiri atas tiga komponen utama senyawa yang berbeda, yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Ketiga senyawa tersebut saling berkelindan dalam sebuah struktur yang rumit dan sulit diurai. Strukturnya dapat dilihat pada Gambar 1.

Selulosa adalah rantai linier dari ratusan hingga 10 ribu molekul D-glukosa yang terikat bersama oleh ikatan glikosidik, biomassa lignoselulosa terdiri dari bentuk kristal dan amorf selulosa, bundel paralel dikelilingi oleh rantai selulosa oleh ikatan hidrogen yang kuat antara kristal bentuk. Hemiselulosa adalah polimer karbohidrat alami paling melimpah kedua di bumi, sebuah kompleks struktur karbohidrat, meliputi xilan, xyloglucan. Hemiselulosa dengan struktur bercabang, amorf, dan ketahanan terhadap hidrolisis lemah tetapi terurai dengan asam menjadi molekul kecil. Lignin, adalah biopolimer ketiga yang ditemukan di alam, terdiri dari fenil propana (p-coumaryl alcohol, koniferil alkohol, dan sinapil alkohol) yang dihubungkan dengan ikatan ester yang membentuk struktur kompleks dengan hemiselulosa untuk membungkus selulosa dan hemiselulosa. Hal ini memungkinkannya untuk menahan hidrolisis dan enzim serta sifat biologisnya yang berfungsi untuk melindungi dinding sel. Biomassa yang kaya akan lignin lebih tahan terhadap degradasi selulosa hemiselulosa untuk diubah menjadi glukosa, Selain itu, selama dekomposisi lignoselulosa mungkin disertai dengan terbentuknya senyawa furan yang dapat menyebabkan terhambatnya proses fermentasi atau pencernaan [20]. Adanya sifat-sifat seperti yang diuraikan di atas pada ketiga senyawa penyusun lignoselulosa, menyebabkan material lignoselulosa sulit didegradasi dan dihidrolisis menjadi monomer-monomernya yang siap difermentasi menjadi alkohol.

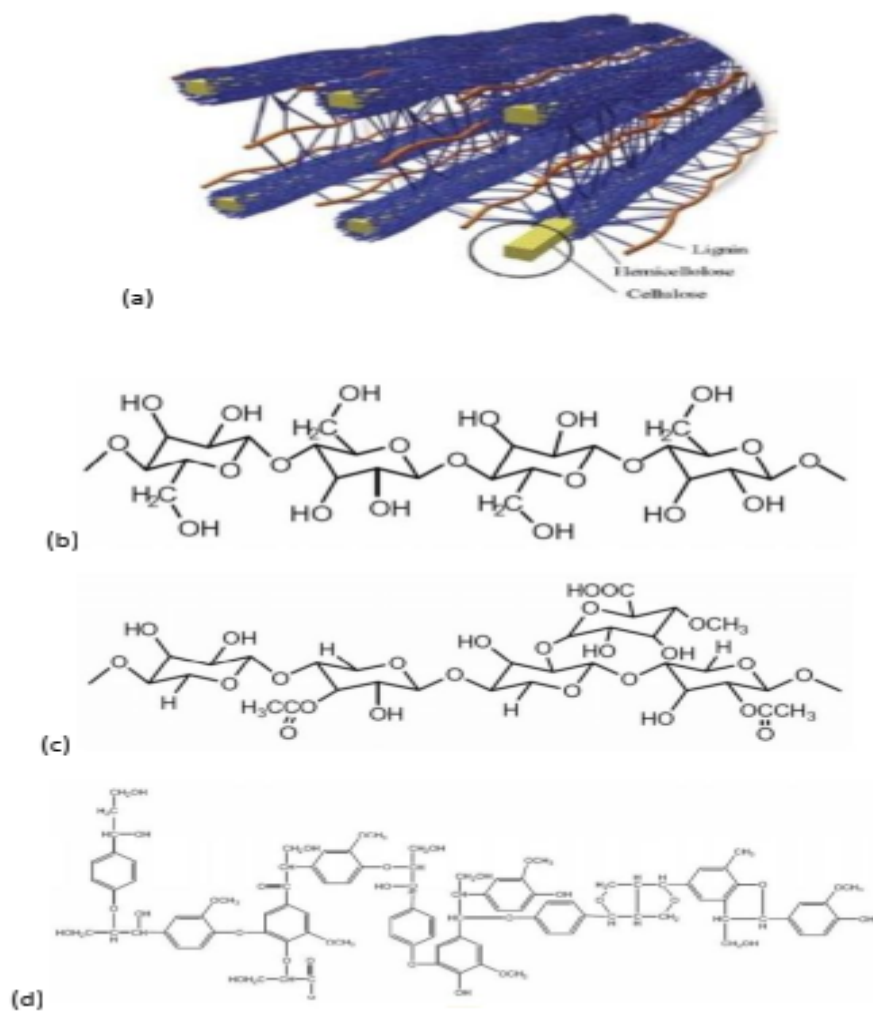
5. Teknologi pretreatment lignoselulase sebagai harapan melewati tantangan

Saat ini sudah banyak teknologi yang dikembangkan untuk mengatasi tantangan di atas, yang dikenal sebagai teknologi *pretreatment*. Secara umum, teknik *pretreatment* dibagi menjadi teknik fisika, teknik kimia, Teknik fisika-kimia, dan teknik biologi seperti tampak dalam diagram pada Gambar 2. Masing-masing teknik memiliki kelebihan dan kekurangan, sehingga dalam penerapannya lebih baik bila dikombinasikan antara satu dengan yang lain sesuai dengan kondisi bahan baku yang akan diolah dan ketersediaan fasilitas pendukung.

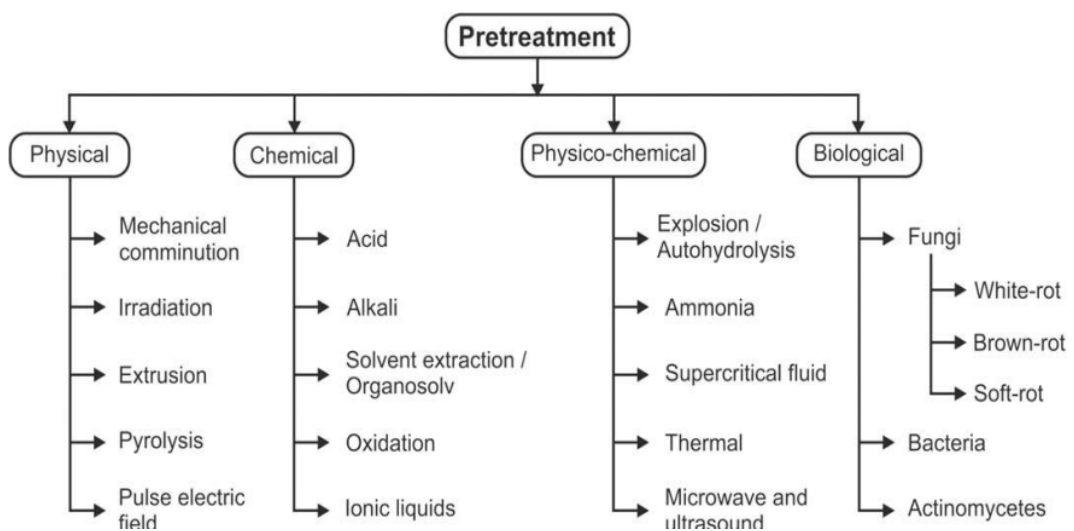
Pretreatment membuat selulosa dan hemiselulosa lebih mudah tersedia untuk enzim hidrolitik, seperti selulase dan hemiselulase, yang menghasilkan gula sederhana. Namun, penggunaan teknologi yang kompleks pada tahap *pretreatment* meningkatkan biaya produksi etanol. *Pretreatment* mengurangi kristalinitas selulosa, yang mengarah ke selulosa amorf, menghilangkan atau mendegradasi lignin (delignifikasi) dan menyebabkan hidrolisis total atau parsial hemiselulosa. Tujuan *pretreatment* adalah: (i) produksi padatan yang sangat mudah dicerna yang meningkat hasil gula selama hidrolisis enzimatis, (ii) untuk menghindari hilangnya gula (terutama gula pentosa), termasuk yang berasal dari hemiselulosa melalui degradasi, (iii) untuk mengurangi pembentukan inhibitor yang dapat menghambat fermentasi lebih lanjut, (iv) pemulihan lignin untuk dimodifikasi menjadi produk sampingan yang berharga, dan (v) pengurangan pemanasan serta ongkos energi.

Pretreatment adalah bagian dari konversi biokimia lignoselulosa dan biasanya dibagi menjadi proses biologis, kimia dan fisik. Dua metode terakhir sering digunakan bersama-sama sebagai *pretreatment* fisikokimia. Metode *pretreatment* fisika, kimia dan fisikokimia didasarkan pada fraksinasi, solubilisasi, hidrolisis dan pemisahan elemen dinding sel. *Pretreatment* kimia meliputi yang menggunakan basa (*base pretreatment*), asam pekat dan encer (*acid pretreatment*), *pretreatment* dengan cairan ionik dan pengolahan dengan oksigen sebagai oksidator (oksidasi basah). Metode mekanis digunakan untuk mengurangi ukuran bahan mentah dan dianggap sebagai proses intensif energi. *Pretreatment* fisika mengurangi kristalinitas dinding sel dan ukuran partikel penggilingan atau penggilingan fisik [23]. *Pretreatment* fisikokimia dapat melibatkan ledakan uap (autohidrolisis), cair air panas (LHW), ledakan serat amonia (AFEX), ammonia recycle percolation (ARP) atau pemrosesan dengan superkritis karbon dioksida (CO₂) (cairan superkritis) [23]. Perlakuan biologis menggunakan mikroorganisme seperti jamur akar putih, coklat atau lunak untuk mendegradasi struktur biomassa. *Pretreatment* seperti ini, terutama dengan jamur pelapuk putih, memiliki efek meningkatkan efisiensi hidrolisis enzimatis. Dibandingkan dengan perlakuan presakarifikasi lainnya, metode biologis lebih ramah lingkungan, tidak menghasilkan produk beracun, tidak memerlukan daur ulang zat kimia dan hemat energi [24]. Delignifikasi menggunakan jamur pelapuk akar putih terjadi melalui pelepasan enzim lignolitik ekstraseluler, seperti peroksidase (EC 1.11.1.7) dan laccase (EC 1.10.3.2.), yang memecah struktur lignin [10].

Kunci utama dari kesulitan proses hidrolisis lignoselulosa menjadi gula yang siap dikonversi menjadi etanol terletak pada keberadaan lignin dalam material tersebut. Oleh karena itu penemuan metode *pretreatment* dengan menggunakan jamur yang menghasilkan enzim pendegradasi lignin tampaknya memberikan harapan yang besar untuk bisa memproduksi bioethanol generasi kedua dengan biaya yang lebih murah.



Gambar 1. (a) Struktur lignoselulosa [21]; (b) selulosa; (c) hemiselulosa dan (d) lignin [22]



Gambar 2. Skema teknologi *pretreatment* [20]

6. Penutup

Berkurangnya sumber serta masalah lingkungan yang ditimbulkan oleh energi fosil memaksa manusia untuk mencari energi baru terbarukan. Salah satu energi terbarukan yang potensia di Indonesia adalah bioethanol generasi kedua. Indonesia sebagai negara luas yang berlim tropis memiliki berbagai produk samping (limbah) tanaman yang melimpah dan potensial untuk dikonversi menjadi bioethanol generasi kedua. Sayangnya produksi bioethanol generasi kedua masih mengalami berbagai kesulitan terutama dalam hal hidrolisis lignoselulosa menjadi gula sederhana yang siap dikonversi menjadi bioethanol melalui proses fermentasi. Dengan ditemukannya agen yang mampu mendegradasi lignin di dalam lignoselulosa melalui proses yang ramah lingkungan dan murah maka ini memberikan harapan ke depan untuk menjadikan bioethanol generasi kedua sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang melimpah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jasman Jasman and Ramadhan Ahmad, "Pengaruh Jenis Perlakuan Awal terhadap Konsentrasi Bioethanol Hasil Hidrolisis dan Fermentasi Tongkol Jagung menggunakan *Trichoderma reesei* dan *Saccharomyces cerevisiae*." [Online]. Available: <http://ejurnal.undana.ac.id/index.php/jbkHalaman%7C25>.
- [2] Dewan Energi Nasional Republik Indonesia, "Outlook Energi Indonesia 2019," *Dewan Energi Nasional Republik Indonesia*, p. 9, 2019.
- [3] R. Hanung, "Indonesia Sudah Impor Bensin Sejak 1997." p. 1, 2018, [Online]. Available: <https://www.cnbcindonesia.com/news/20180125133825-4-2488/indonesia-sudah-impor-bensin-sejak-1997>.
- [4] E. Commission, "Causes of climate change."
- [5] J. Jasman, "PENINGKATAN HASIL FERMENTASI BIOETANOL DARI NIRA SORGUM MANIS (*Sorghum bicolor* L. Moench) DENGAN MENGGUNAKAN BIAKAN CAMPURAN DUA GALUR KHAMIR," Gadjah Mada University, 2014.
- [6] M. Balat and H. Balat, "Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 11, pp. 2273–2282, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.03.015.
- [7] A. PANDEY, C. LARROCHE, S. CRICKE, C.-G. DUSSAP, and E. GNANSOUNOU, *BIOFUELS ALTERNATIVE FEEDSTOCKS AND CONVERSION PROCESSES*, no. April, 2011.
- [8] P. R. Waghmare, A. D. Watharkar, B. Jeon, and S. P. Govindwar, "Bio-ethanol production from waste biomass.pdf."
- [9] M. Tayyab *et al.*, "Bioethanol production from lignocellulosic biomass by environment-friendly pretreatment methods: A review," *Appl. Ecol. Environ. Res.*, vol. 16, no. 1, pp. 225–249, 2018, doi: 10.15666/aer/1601_225249.
- [10] K. Robak and M. Balcerek, "Review of second generation bioethanol production from residual biomass," *Food Technology and Biotechnology*, vol. 56, no. 2. University of Zagreb, pp. 174–187, Apr. 01, 2018, doi: 10.17113/ftb.56.02.18.5428.
- [11] P. S. Nigam and A. Singh, "Production of liquid biofuels from renewable resources," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 37, no. 1, pp. 52–68, 2011, doi: 10.1016/j.pecs.2010.01.003.
- [12] Badan Pusat Statistik, "<https://www.bps.go.id/linkTableDinamis/view/id/960>." pp. 335–58, 2017, doi: 10.1055/s-2008-1040325.
- [13] Siti Rochani, "KUPAS TUNTAS LIMBAH JERAMI PADI UNTUK PAKAN TERNAK - Dinas Ketahanan Pangan dan Peternakan." 2020, [Online]. Available: <http://dkpp.jabarprov.go.id/post/641/kupas-tuntas-limbah-jerami-padi-untuk-pakan-ternak>.
- [14] S. Aisyah, "Tongkol Jagung Disulap Menjadi Bahan Plastik Ramah Lingkungan - Chemical Engineering." 2019, [Online]. Available: <http://chemeng.teknik.unej.ac.id/tongkol-jagung-disulap-menjadi-bahan-plastik-ramah-lingkungan/>.
- [15] J. Jasman, "Potensi tongkol jagung untuk produksi bioethanol di nusa tenggara timur."
- [16] R. Novia Yanti and I. L. Hutasuhut, "Potensi Limbah Padat Perkebunan Kelapa Sawit Di Provinsi Riau," *Wahana For. J. Kehutan.*, vol. 15, no. 2, pp. 1–11, 2020, doi: 10.31849/forestra.v15i2.4696.
- [17] Ditjenbun, "Produksi Kelapa Sawit Menurut Provinsi di Indonesia, 2017-2021," *Artik.*

- Online, vol. 2021, p. 2021, 2021, [Online]. Available: pertanian.go.id/home/?show=page&act=view&id=61.
- [18] Badan Pusat Statistik, "Produksi Kayu Hutan (M3), 2018-2020." [Online]. Available: <https://www.bps.go.id/indicator/60/167/1/produksi-kayu-hutan.html>.
- [19] https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/nove/Wood_anatomy/WAEF-02-chemical_composition.pdf, "Chemical composition of wood presentation Wood Anatomy," pp. 1–25, 2018, [Online]. Available: https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/nove/Wood_anatomy/WAEF-02-chemical_composition.pdf.
- [20] R. Abbas Azeez and F. K. Al-Zuhairi, "Biofuels (Bioethanol, Biodiesel, and Biogas) from Lignocellulosic Biomass :A Review The Production of Ethanol from Sugar Beet Waste by Immobilized *Saccharomyces Cerevisiae* View project Removal organic from produce water by agriculture waste as adsorbent Vi," in *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 2020, no. 28, p. 2020, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/342425236>.
- [21] A. Brandt, J. Gräsvik, J. P. Hallett, and T. Welton, "Deconstruction of lignocellulosic biomass with ionic liquids," *Green Chem.*, vol. 15, no. 3, pp. 550–583, 2013, doi: 10.1039/c2gc36364j.
- [22] repository polban, "Struktur Kimia Lignoselulosa." [Online]. Available: <http://digilib.polban.ac.id/files/disk1/265/jbptppolban-gdl-dheaelitap-13211-3-bab2--8.pdf>.
- [23] G. Brodeur, E. Yau, K. Badal, J. Collier, K. B. Ramachandran, and S. Ramakrishnan, "Chemical and physicochemical pretreatment of lignocellulosic biomass: A review," *Enzyme Res.*, vol. 2011, no. 1, 2011, doi: 10.4061/2011/787532.
- [24] P. Kumar, D. M. Barrett, M. J. Delwiche, and P. Stroeve, "Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 48, no. 8, pp. 3713–3729, 2009, doi: 10.1021/ie801542g.