

Tesis

**Pengaruh Metode Microwave Plasma Dalam Cairan Terhadap
Kadar Glukosa Dalam Ampas Tebu (Blotong)**



Disusun Oleh :

MUH. FIRDAN NURDIN

NIM : D022 17 1001

DEPARTEMEN MESIN FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2020



**Pengaruh Metode Microwave Plasma dalam Cairan
Terhadap Kadar Glukosa Dalam Ampas Tebu (Blotong)**

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi**

Teknik Mesin / Konversi Energi

Disusun dan diajukan oleh

MUH. FIRDAN NURDIN

Kepada

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK

SEKOLAH PASCASARJANA

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2020



TESIS

**Pengaruh Metode Microwave Plasma dalam Cairan Terhadap Kadar Glukosa
Dalam Ampas Tebu (Blotong)**

Disusun dan diajukan oleh

MUH. FIRDAN NURDIN

Nomor Pokok D022171001

Telah dipertahankan didepan Panitia Ujian Tesis
pada tanggal 26 Desember 2019
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui
Komisi Penasehat,

Dr. Eng. Andi Erwin Eka Putra, ST., MT.

Ketua

Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST., MT

Anggota

Ketua Program Studi Magister
Teknik Mesin,



Dr. Muhammad Arsyad, ST., M.T.

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin,



Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha., MT



PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

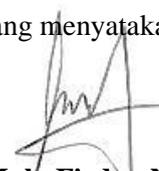
Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Muh. Firdan Nurdin
Nomor Mahasiswa : D022171001
Program Studi : Teknik Mesin / Konversi Energi

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 07 Januari 2020

Yang menyatakan



Muh. Firdan Nurdin



KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb

Puji dan syukur dipanjatkan atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan kekuatan, rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul ***“Pengaruh Metode Microwave Plasma dalam Cairan Terhadap Kadar Glukosa dalam Ampas Tebu (Blotong)”***. Penyusunan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Master Teknik di Departemen Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Makassar.

Penulis menyadari dalam penyusunan tesis ini masih terdapat kekurangan dikarenakan keterbatasan penulis sebagai manusia biasa. Untuk itu penulis sangat mengharapkan kritik dan saran dalam tesis ini. Semoga tesis ini berguna bagi penulis dan pihak-pihak lain sebagai acuan untuk kebutuhan ilmu pengetahuan.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan bimbingan serta masukan, sehingga penulis dapat menyelesaikan

Penulis juga sangat menyadari penyusunan tesis ini tidak akan selesai tanpa kerja keras penulis dan bantuan orang-orang terdekat yang selalu



memberikan berbagai macam dukungan dan masukan demi kelancaran tesis ini.

Atas alasan itu pula penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua saya, Bapak Nurdin Acang, dan Ibunda tercinta Farida yang tak henti – hentinya memberikan dukungan baik materil dan moril
2. Dr. Eng. Andi Erwin Eka Putra, ST. MT selaku pembimbing I Tugas Akhir
3. Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST. MT selaku pembimbing II Tugas Akhir
4. Bapak Ir. H. Ilyas Renreng, MT selaku ketua Departemen Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin beserta seluruh staff Departemen Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bantuan dan kemudahan yang diberikan.
5. Segenap Dosen Departemen Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.
6. Seluruh teman – teman sesama mahasiswa di Departemen Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Wassalamu'alaikum Wr. Wb

Makassar, 07 Januari 2020



ABSTRAK

Tebu (*Saccharum officinarum* L.) adalah tanaman yang sangat diperlukan, mewakili sebagian besar tanaman budidaya di seluruh dunia. Tebu diproses untuk menghasilkan gula kristal dan bioetanol. Proses pengolahan menghasilkan limbah ampas tebu. Limbah ampas tebu dapat dimanfaatkan melalui beberapa pengolahan. Dalam penelitian ini, perlakuan plasma dalam cairan diaplikasikan pada ampas tebu untuk melihat pengaruhnya pada konsentrasi glukosa dan produk samping. Parameter input energi adalah 340, 360, dan 400 W dengan waktu iradiasi 1, 2,5 dan 5 menit. Pengujian sampel menggunakan metode Nelson Somogyi untuk mengetahui persentase glukosa serta Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), Scanning Electron Microscope (SEM) dan software Image-J untuk karakterisasi sampel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sampel yang telah diplasma mengalami penurunan glukosa. Penurunan glukosa tertinggi sekitar 99,18% pada input energi 360 Watt dengan waktu iradiasi 5 menit sedangkan penurunan glukosa terendah sekitar 27,62% pada input energi 340 Watt dengan waktu iradiasi 5 menit. Produk samping yang dihasilkan adalah nanopartikel selulosa yang memiliki diameter rata-rata dari 194,23, 206,50, dan 217,08 nm pada semua variasi input energi.



ABSTRACT

Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) is an indispensable plant, representing most of the cultivated plants throughout the world. Sugarcane is processed to produce crystalline sugar and bioethanol. The treatment process produces sugarcane bagasse waste. Sugarcane bagasse waste can be utilized through some treatment. In this study, plasma treatment in-liquid was applied to sugarcane bagasse to see its effect on glucose concentration and its by-products. Energy input parameters are 340, 360, and 400 W for irradiation time of 1, 2.5 and 5 minutes. The samples were tested using the Nelson Somogyi method to determine the percentage of calculations and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), Scanning Electron Microscope (SEM) and Image-J software for characterization of samples. The results showed the highest decreased of percentage glucose is around 99.18% at 360 Watt input energy for irradiation time of 5 minutes while the lowest decreased of percentage glucose is around 27.62% at 340 Watt input energy for irradiation time of 5 minutes. The by-product resulted in cellulose nanoparticles which had an average diameter from 194.23, 206.50, and 217.08 nm at each energy input variation.



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
ABSTRAK	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL DAN GRAFIK	vii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	2
C. Batasan Masalah	3
D. Tujuan Penelitian	3
E. Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
A. Perkembangan Bioetanol Secara Global	5
B. Bioetanol	7
C. Selulosa, Hemiselulosa dan Lignin dalam Biomassa Lignoselulosa	17
D. Ampas Tebu	18
E. Pre-treatment Ampas Tebu	21
F. Nanopartikel Selulosa	22
G. Teknologi Plasma dan Aplikasinya	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
A. Waktu dan Tempat Penelitian	29
B. Jenis Penelitian	30
C. Alat dan Bahan	30
D. Metode Penelitian	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	37
A. Analisa Data Sampel	37
B. Analisis Produk Samping	44
KESIMPULAN	58
DAFTAR PUSTAKA	59



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Permintaan Bioetanol Secara Global (a) Produksi bioetanol secara global dalam 10 tahun terakhir; (b) Produksi etanol USA selama 1980-2015	6
Gambar 2. Skema alur produksi etanol dari biomassa	9
Gambar 3. Skema Selulosa, hemiselulosa dan lignin dalam lignoselulosa pada skala <i>macrofibril</i> , <i>microfibril</i> , dan <i>elementary fibril</i>	19
Gambar 4. Struktur Kimia Selulosa (a), Hemiselulosa (b), dan Lignin (c)	20
Gambar 5. CNC (a) dan CNF (b) dari Ampas Tebu	23
Gambar 6. Bentuk CNP dari kapas (a) dan kentang (b)	24
Gambar 7. Ilustrasi fase materi keempat setelah fase padat, cair dan gas	26
Gambar 8. HV (a), RF (b) dan MW (c) plasma dalam fase cair	27
Gambar 9. Skema Treatment Microwave Plasma dalam Cairan	34
Gambar 10. Dekomposisi glukosa untuk produksi hidrogen sebagai fungsi dari konsentrasi glukosa selama proses microwave plasma dalam cairan	41
Gambar 11. Hasil SEM Pada Pembesaran 5000x (a) SPP320, (b) SPP360, dan (c) SPP400	47
Gambar 12. Hasil SEM Pada Pembesaran 10000x (a) SPP320, (b) SPP360, dan (c) SPP400	50
Gambar 13. Hasil SEM Pada Pembesaran 25000x (a) SPP320, (b) SPP360, dan (c) SPP400	52
Gambar 14. Nanopartikel dari Kapas	55
Gambar 15. Nanopartikel dari Ampas Tebu	10



DAFTAR TABEL DAN GRAFIK

Tabel 1. Karakteristik Etanol dan Gasoline	7
Tabel 2. Potensi beberapa biomassa gula sebagai bahan baku etanol	10
Tabel 3. Potensi beberapa tanaman berpati sebagai bahan baku bioetanol	13
Tabel 4. Potensi biomassa lignoselulosa sebagai bahan baku etanol	15
Tabel 5. Persentase Selulosa, Hemiselulosa dan lignin pada biomassa lignoselulosa	17
Tabel 6. Jenis-jenis Plasma	26
Tabel 7. Jadwal Penelitian	29
Tabel 8. Peaks FT-IR Bahan Lignoselulosa	46
Table 9. Hasil rata – rata ukuran partikel dari sampel pada pembesaran 5000x	49
Tabel 10. Hasil rata – rata ukuran partikel dari sampel pada pembesaran 10000x	52
Tabel 11. Hasil rata – rata ukuran partikel dari sampel pada pembesaran 25000x	55
Grafik 1. Persentase Glukosa dalam Ampas Tebu Pada Variasi Input Energi	39
Grafik 2. Laju Produksi Gas (mL/s) Pada Variasi Input Energi	41
Grafik 3. FT-IR Sampel Pada Input Power 340 W	42
Grafik 4. FT-IR Sampel Pada Input Power 360 W	42
Grafik 5. FT-IR Sampel Pada Input Power 400 W	43
Grafik 6. FT-IR Solid Produk Plasma (SPP)	45



BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Saat ini kebutuhan akan energi semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah populasi di suatu negara. Namun, peningkatan kebutuhan tersebut tidak didukung dengan ketersediaan energi fosil yang semakin terbatas sehingga energi alternatif terus dikembangkan. Salah satu energi alternatif tersebut adalah bioenergi berupa biofuel. Biofuel merupakan bahan bakar yang dihasilkan dari biomassa tanaman dimana salah satu produknya yakni bioetanol. Bioetanol dapat dihasilkan dari tanaman gula (seperti tebu dan jagung), dan tanaman yang mengandung zat tepung [1]. Namun, terdapat masalah dalam mempertimbangkan antara isu kebutuhan pangan dan energi. Oleh karena itu, limbah dari proses pengolahan tanaman pangan tersebut dikembangkan untuk menghasilkan bioetanol. Salah satu limbah yang dimanfaatkan yakni ampas tebu (*sugarcane bagasse*)[2].

Ampas tebu mengandung selulosa sekitar 39,5% - 45,7%, hemiselulosa sekitar 25,6% - 29,6%, lignin sekitar 2,3% - 10,5% [3]. Selulosa terdiri dari molekul glukosa yang terhubung secara ekuatif yang berasosiasi melalui ikatan hidrogen yang kuat[4]. Molekul glukosa tersebut merupakan bahan dasar untuk fermentasi dalam pembuatan bioetanol. Molekul glukosa dapat dihasilkan memecah ikatan selulosa melalui proses *pre-treatment*[5]. Proses tersebut dilakukan dengan proses fisika-kimia seperti hidrolisis asam atau alkali,



Ultrasonik-kimia, dan microwave-kimia [5], [6]. Proses pre-treatment microwave-kimia menggunakan bahan kimia seperti H_2SO_4 dan $NaOH$ yang diintegrasikan dengan gelombang mikro untuk menghasilkan glukosa sekitar 64% dan 86%, masing-masing[7].

Saat ini, terdapat metode yang dikembangkan agar mampu meningkatkan glukosa dari ampas tebu yakni dengan metode plasma. Hal ini dikarenakan plasma memiliki suhu yang sangat tinggi sekitar $10^3 - 10^4$ K sehingga dapat menghasilkan spesies reaktif seperti elektron, ion, radikal, dll yang dapat meningkatkan reaksi kimia untuk memecah ikatan[8]. Reaksi kimia tersebut diharapkan mampu memecah energi ikatan kimia dari ampas tebu dengan efektif efisien. Metode plasma yang telah dikembangkan untuk proses degradasi selulosa adalah metode plasma dalam cairan. Prasertsung dkk telah melaporkan bahwa degradasi selulosa dengan menggunakan metode plasma dalam cairan pelarut H_2SO_4 mampu menghasilkan gula reduksi sekitar 25 – 42%[9]. Sehingga diharapkan dengan metode plasma dalam cairan, kadar gula reduksi dalam ampas tebu mampu ditingkatkan untuk proses produksi bioetanol.

Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisa **Pengaruh metode Microwave Plasma dalam Cairan terhadap kadar glukosa dalam Ampas Tebu Blotong.**



B. Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh perlakuan Microwave Plasma dalam Cairan terhadap kadar glukosa ampas tebu (Blotong) dan air destilasi (Aquadess) ?
2. Bagaimana karakteristik produk hasil yang telah melalui proses Microwave Plasma dalam Cairan?

C. Batasan Masalah

Pada penelitian metode Microwave Plasma dalam Cairan, parameter sebagai berikut :

1. Waktu iradiasi yakni 1, 2.5 dan 5 menit.
2. Input energi alat teknologi plasma yakni 340, 360, 400 Watt pada tekanan 1 atm.
3. Sampel ampas tebu (Blotong) 10% w/w (berat ampas tebu per berat air destilasi).
4. Larutan NaOH 3 %.

D. Tujuan Penelitian

Tujuan aplikasi teknologi plasma ini yaitu :

1. Menghitung perubahan kadar glukosa pada ampas tebu (Blotong) setelah proses Microwave Plasma dalam Cairan dengan parameter input energi dan waktu treatment.
2. Menganalisis karakteristik pada produk hasil setelah proses Microwave Plasma dalam Cairan menggunakan analisa FT-IR dan SEM.



E. Manfaat Penelitian

1. Sebagai awal pengembangan aplikasi teknologi microwave plasma untuk pengolahan limbah industri khususnya industri gula di Indonesia.
2. Sebagai teknologi yang nantinya diharapkan dapat digunakan untuk memproduksi biofuel dengan efisiensi dan efektifitas yang lebih baik dibandingkan dengan metode sebelumnya.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Perkembangan Bioetanol Secara Global

Bioenergi adalah energi alternatif yang berasal dari bahan organik (biomassa) yakni tanaman yang mengalami proses fotosintesis. Bioenergi ditujukan sebagai pengganti bahan bakar fosil yang terbatas serta emisi gas yang rendah (ramah Lingkungan) [1].

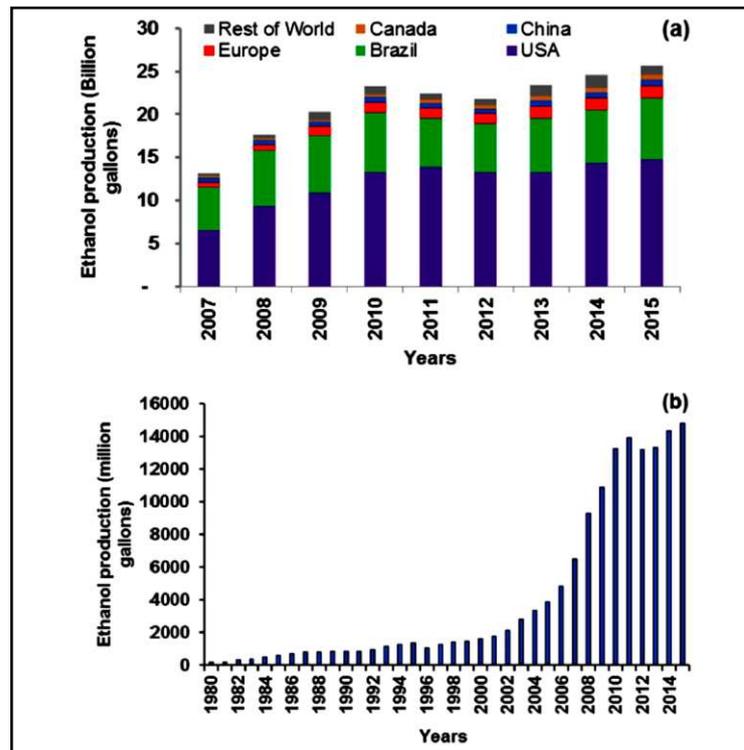
Perkembangan global bioenergi dapat dilihat dari data produksi primer terestrial tahunan yang menambahkan sekitar 120×10^{15} g biomassa vegetatif kering[10], menyimpan $2,2 \times 10^{21}$ J energi dalam bahan tanaman[11]. Permintaan energi global adalah $5,5 \times 10^{20}$ J pada tahun 2010. Diperkirakan akan meningkat menjadi $6,6 \times 10^{20}$ J pada tahun 2020 dan $8,6 \times 10^{20}$ J pada tahun 2040 [12].

Ketersediaan energi dan pemeliharaan lingkungan adalah dua isu utama di dunia saat ini yang telah mendorong permintaan akan sumber energi alternatif dan ramah lingkungan[13]. Pembakaran bahan bakar fosil berkontribusi terhadap pemanasan global yang menyebabkan perubahan iklim, kenaikan permukaan laut, hilangnya keanekaragaman hayati dan polusi perkotaan[14]. Banyak negara, seperti Amerika Serikat, Brasil, Cina, Kanada, dan beberapa negara anggota UE

menyatakan komitmen untuk program bioetanol sebagai upaya untuk



mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Permintaan akan bioetanol saat ini secara global telah meningkat dari waktu ke waktu (Gambar 1a-b)[13].



Gambar 1. (a) Produksi bioetanol secara global dalam 10 tahun terakhir; (b) Produksi etanol USA selama 1980-2015[13].

Negara-negara bagian Amerika menghasilkan jumlah etanol tertinggi, yang diperkirakan lebih dari setengah total etanol global yang diproduksi pada tahun 2015. Total produksi etanol di AS telah meningkat secara dramatis dari 175 juta galon pada tahun 1980 menjadi 14810 juta galon pada tahun 2015 (Gambar 1b)[13].

Sebagian besar, bioenergi yang diperoleh setiap tahun oleh tanaman darat adalah 3 - 4 kali lebih besar daripada kebutuhan energi manusia. Potensi bioenergi dari total luas lahan di dunia, tidak termasuk lahan infrastruktur, hutan liar dan hutan den-ser diperkirakan 190×10^{18} J



yr-1, 35% dari permintaan energi global saat ini [15]. Peluang pengembangan bioenergi di Indonesia sangat besar, namun masih terbatas pada bioetanol generasi pertama seperti tanaman pertanian, pohon atau sampah organik. Sedangkan bioetanol generasi kedua seperti biomassa lignoselulosa belum dikembangkan.

B. Bioetanol

Etanol (C_2H_5OH) merupakan sumber energi menjanjikan atas gasoline (C_7H_{17}) karena memiliki beberapa sifat menguntungkan. Meskipun satu liter etanol memberikan 66% energi yang disediakan oleh jumlah gasoline yang sama, yang memiliki angka oktan lebih tinggi (106-110) daripada gasoline (91-96) yang mana meningkatkan kinerja gasoline bila dicampur dengan etanol[16]. Selain itu, etanol memiliki entalpi penguapan yang lebih tinggi (1177 kJ/kg pada suhu 60 °C) daripada gasoline (348 kJ/kg pada suhu 60 °C) sehingga efisiensi volumetrik campuran etanol lebih tinggi daripada efisiensi gasoline murni, sehingga meningkatkan daya output [17]–[20]. Untuk karakteristik dari etanol dan gasoline dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Etanol dan Gasoline[1]

Sifat	Satuan	Etanol	Gasoline
Formula Kimia		C_2H_5OH	C_4-C_{12}
Berat Molekul		46,07	110 avg
Ultimate Analysis (wt%)			
C		52,14	85–88
H		13,13	12–15
O		34,73	NoI
Densitas (20°C)	kg/m ³	789	690–800
Titik didih Atmosfer	°C	78,5	27–225



Panas Laten Penguapan (20°C)	MJ/kg	0,839	0,349
HHV (20°C)	MJ/kg	29,8	47,2
Rasio udara / bahan bakar stoikiometrik	kg/kg	8,97	14,7
Kelarutan (20°C)	wt%	Infinite	0,009
Research Octane Number (RON)		111	88–98
Motor Octane Number (MON)		92	80–88

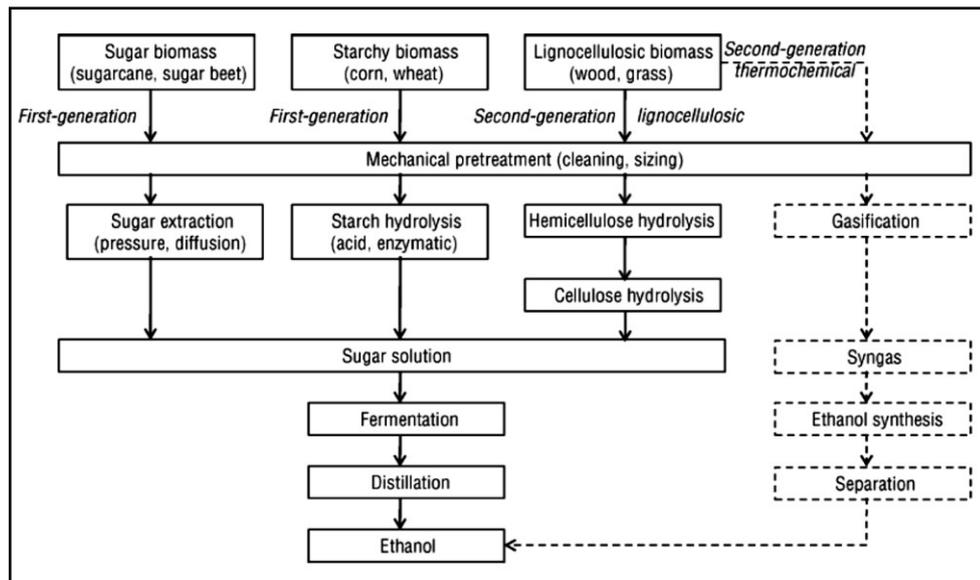
Etanol memiliki nilai kalori yang jauh lebih rendah daripada gasoline sehingga konsumsi bahan bakar jauh lebih tinggi untuk kendaraan agar menyamai gasoline. Namun, etanol menunjukkan efisiensi energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan bensin karena rasio kompresi yang lebih tinggi sehingga menghasilkan panas yang lebih tinggi dari proses penguapan dan angka oktan yang lebih tinggi. Disebabkan oleh beberapa faktor yang dijelaskan sebelumnya, maka konsumsi etanol murni (E100) dalam mesin sekitar 51% lebih tinggi daripada bensin. Namun, jika bensin dicampur dengan etanol 10% (E10), konsumsi bahan bakar hanya 3,3% lebih tinggi dibandingkan dengan bensin murni[1].

Bioetanol memiliki karakteristik yang dapat menjadi perbandingan bahan bakar fosil jenis gasolin. Bioetanol merupakan biofuel yang paling utama karena menyumbang 94% dari produksi biofuel global. Pada tahun 2006, produksi etanol secara global mencapai 51 miliar liter, yang mewakili pasokan energi sebesar 3%

permintaan gasolin dunia. Pada awal abad 20, etanol sebagai bahan bakar dalam mesin pembakaran internal yang diciptakan oleh Nikolaus Otto tahun 1876. Namun, gasolin sebagai alternatif yang lebih murah untuk



peningkatan jumlah mobil dan memulai industri minyak modern. Bioetanol dapat diproduksi dari berbagai bahan baku biomassa, seperti yang ditunjukkan secara skematik pada Gambar 2[1].



Gambar 2. Skema alur produksi etanol dari biomassa[1]

Berdasarkan sumber bahan bakunya, terbagi dua jenis bahan baku yaitu bioetanol generasi pertama dan bioetanol generasi kedua. Bioetanol generasi pertama, bahan bakunya berasal dari bahan berpati yang berbasis bahan pangan. Sedangkan bioetanol generasi kedua, bahan bakunya berasal dari 8 limbah biomassa[1], [13]. Bioetanol generasi pertama mulai dikembangkan di Indonesia, namun bioetanol generasi ini harganya masih relatif tinggi karena bahan bakunya juga digunakan sebagai bahan pangan dan pakan. Bahan baku yang berbasis bahan makanan akan menimbulkan pertimbangan isu antara kebutuhan pangan dan energi, serta penggunaan lahan yang luas untuk tanaman pangan tersebut. Untuk

menurunkan harga dan menghindari pertimbangan isu tersebut, bioetanol generasi kedua perlu dikembangkan. Berikut sumber bahan bakunya.



1. Tanaman Gula

Bahan baku berbasis gula termasuk beberapa tanaman seperti tebu, gula bit dan sorgum manis; buah-buahan seperti anggur, kurma, air melon dan apel; dan limbah kilang gula, yaitu tetes tebu[21]. Keuntungan utama dari tanaman gula sebagai bahan baku etanol adalah hasil gula yang tinggi dan biaya konversi yang rendah, sementara kekurangannya yakni ketersediaan musiman dari tanaman ini [12]. Dalam proses produksi etanol, masing-masing tanaman gula maupun limbah industri memiliki beberapa potensi sebagai bahan baku etanol yang dirangkum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Potensi beberapa biomassa gula sebagai bahan baku etanol[13]

Biomassa	Informasi Utama yang Berpengaruh
Tebu (<i>Saccharum officinarum</i>)	<ul style="list-style-type: none">• Hasil biomassa tinggi• Kadar sukrosa tinggi• Efisiensi tinggi untuk mengakumulasi energi matahari• Produksi global adalah 360 juta ton/tahun• Hasil panen adalah 60-79,5 t/ha• Residu adalah sumber yang baik untuk menghasilkan listrik dan bioetanol generasi ke-2
Sorgum manis	<ul style="list-style-type: none">• Dapat tumbuh di tanah gersang• Jus tangkai merupakan bahan baku yang menjanjikan untuk bioetanol, sedangkan biji-bijian digunakan untuk makanan dan produksi etanol berbasis pati• Tangkai mengandung sejumlah besar sukrosa, glukosa dan fruktosa• Hasil sirup rata-rata dari tangkai adalah



	1900 L / ha
Bit gula (<i>Beta vulgaris</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Sumber utama gula di Eropa dan Amerika Utara • Hasil panen adalah 79,1 t / ha • Hasil sirup rata-rata adalah 60-120 t / ha • Hasil etanol rata-rata adalah 95 L / ton tangkai
Semangka (<i>Citrullus lanatus</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Sekitar 20% limbah semangka selama atau setelah panen dapat digunakan sebagai bahan baku bioetanol • Dalam bentuk jus dapat digunakan sebagai pengencer molase yang meningkatkan kadar gula dalam bahan baku dan mengurangi penggunaan air
Kurma (<i>Phoenix dactylifera</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Sejumlah besar kurma terbuang setiap tahun di negara-negara penghasil kurma, yang dapat digunakan sebagai bahan baku etanol • Mengandung gula individu dalam jumlah tinggi (sukrosa, glukosa dan fruktosa) yang diperkirakan sekitar 70%
Tetes Tebu	<ul style="list-style-type: none"> • Bahan baku etanol yang terkenal dan kaya dengan sukrosa, glukosa dan fruktosa • Limbah industri • Valorisasi bahan limbah • Hasil molase sekitar 3–7 t/100 t tebu

Tebu adalah tanaman C4 yang memiliki kemampuan tinggi untuk mengubah radiasi matahari menjadi biomassa[22], dan tumbuh di negara tropis dan subtropis. Sari tangkai tebu dan produk samping dari kilang gula (molase)



telah digunakan sebagai bahan baku yang menjanjikan untuk produksi bioetanol selama bertahun-tahun[13].

Brasil menghasilkan sekitar 70-79% bioetanol berbahan dasar jus tebu pada tingkat produksi global, sedangkan Indonesia menargetkan sekitar 5% bioetanol berbahan dasar molases pada tingkat produksi nasional[23]–[25]. Sari tebu memiliki cukup nutrisi dan mineral organik, serta mengandung gula yang dapat difermentasi membuatnya menjadi bahan baku ideal untuk produksi bioetanol. Namun, konsentrasi gula dalam jus sangat bervariasi tergantung pada kematangan dan waktu panen[13].

2. Tanaman Berpati (Zat Tepung)

Tanaman berpati banyak digunakan untuk produksi bioetanol karena tersedia di seluruh dunia, mudah diproses, dan hasil etanol tinggi. Tanaman ini termasuk sereal (60–80% pati), umbi dan akar (60-90% pati), polong-polongan (25–50% pati), dan buah hijau (Sebanyak 70% pati)[26]. Jagung, biji-bijian sorgum, gandum, singkong, kentang dan ubi merupakan sumber bahan bakar etanol yang terkenal[27]. Setiap tanaman dapat bervariasi dalam hal efisiensi konversi dan hasil etanol. Berikut dapat dilihat variasi tanaman serta keunggulannya dalam tabel 3.



Tabel 3. Potensi beberapa tanaman berpati sebagai bahan baku bioetanol[13]

Tanaman	Fitur utama yang berpengaruh
Jagung (Zea mays)	<ul style="list-style-type: none"> • Etanol dari jagung adalah teknologi yang aplikatif. • Tidak ada jagung yang terbuang, secara keseluruhan dapat berkontribusi sebagai bahan baku. • Sekitar 5% jagung terbuang setiap tahun yang dapat menghasilkan sekitar $9,3 \times 10^9$ L etanol dengan kemampuan penggantian sekitar $6,7 \times 10^9$ L gasoline. • Produk samping kaya protein dari etanol jagung digunakan sebagai pakan ternak • Hibrida fermentasi tinggi dapat dengan mudah dikembangkan untuk meningkatkan hasil etanol
Gandum (Triticum aestivum)	<ul style="list-style-type: none"> • Efisiensi konversi tepung terigu menjadi etanol sekitar 95% • Produksi energi tahunan untuk bioetanol yang berasal dari gandum adalah 66 GJ/ha • Hasil kernel adalah 5,1 t/ha
Singkong (Manihot esculenta)	<ul style="list-style-type: none"> • Tanaman akar tropis yang diproduksi oleh banyak negara • Dapat dengan mudah dihidrolisis • Pati singkong tidak banyak diaplikasikan dalam industri makanan dibandingkan dengan tepung jagung, sehingga tersedia dengan harga murah • Tersedia sepanjang tahun karena mudah dalam hal penanaman dan panen • Hasil panen adalah 13,6 t/ha
Sorgum (gandum hum bicolor)	<ul style="list-style-type: none"> • kaya akan pati seperti jagung • Kemampuan untuk tumbuh dalam berbagai jenis tanah dan iklim • Efisien dalam penggunaan air



Ubi (<i>Ipomoea batatas</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Tanaman pokok yang penting dalam biomassa • Diproduksi secara global • Tanaman tahan kekeringan yang membutuhkan sedikit bahan kimia dan pupuk • Dapat ditanam di tanah marginal
Kentang (<i>Solanum tuberosum</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Kaya akan pati • Pemrosesan lebih mudah • Sekitar 5-20% kentang terbuang sia-sia yang dapat digunakan untuk produksi bioetanol • Produksi global lebih dari 140 juta ton/tahun

Jagung adalah tanaman sereal yang banyak digunakan untuk produksi bioetanol pada skala komersial dan penggunaannya telah meningkat secara dramatis di tahun terakhir. Mengingat lokasi geografis, Amerika Utara menghasilkan jagung dalam jumlah terbesar, diikuti oleh Asia, Eropa dan Amerika Selatan[28]. Amerika Serikat adalah produsen jagung yang dominan etanol, yang menghasilkan jumlah etanol dari bahan baku ini (15,25 miliar galon) pada tahun 2016, dan pada saat yang sama telah diekspor sekitar 1000 juta galon etanol ke 50 negara terdekat[29]. Saat ini, negara-negara di Eropa juga berkeinginan untuk memproduksi etanol dari jagung. Oleh karena itu, etanol berbahan dasar jagung secara bertahap menjadi biofuel global dengan kepentingan ekonomi besar.

3. Biomassa Lignoselulosa



Biomassa lignoselulosa dapat dibagi menjadi beberapa kelompok, tanaman energi (rumput abadi dan tanaman energi khusus lainnya),

tanaman air (eceng gondok), tanaman hutan (kayu lunak, kayu keras, serbuk gergaji, sisa pemangkasan dan penipisan kulit pohon), residu pertanian (ampas tanaman), dan bagian organik dari limbah padat. Setiap kelompok biomassa memiliki beberapa potensi untuk digunakan dalam produksi etanol sebagaimana dirangkum dalam Tabel 2.4[13]. Secara umum, biomassa lignoselulosa dapat digunakan untuk menghasilkan etanol tanpa membutuhkan lahan ekstra atau kekhawatiran akan produksi tanaman pangan dan pakan. Produksi global biomassa tanaman, lebih dari 90% adalah lignoselulosa, jumlahnya sekitar 200×10^9 ton/tahun, di mana sekitar $8 - 200 \times 10^9$ ton biomassa primer tetap berpotensi untuk dimanfaatkan[30].

Tabel 4. Potensi biomassa lignoselulosa sebagai bahan baku etanol[13]

Biomassa	Fitur utama yang berpengaruh
Rumput	<ul style="list-style-type: none"> • Hasil biomassa tinggi • Kadar selulosa tinggi • Mudah tumbuh dan panen • Memiliki potensi untuk menutupi 50-70% dari total bahan baku bioetanol • Hasil panen dapat berkisar antara 0,9 hingga 37 t bahan kering/ha • Potensi hasil etanol adalah 160-460 L/ton biomassa
Tanaman Air	<ul style="list-style-type: none"> • Tumbuh di dalam air • Pertumbuhannya sangat cepat • Dapat juga digunakan untuk pemurnian air untuk mengekstrak nutrisi dan logam berat • Produktivitas biomassa sangat tinggi • Berlimpah di bagian dunia tertentu sehingga



	menjadi bahan baku yang cocok untuk produksi etanol yang didistribusikan
Residu Pertanian	<ul style="list-style-type: none"> • Tersedia dengan mudah • Valorisasi dan pengelolaan limbah pertanian ramah lingkungan • Mmeminimalkan ketergantungan pada biomassa kayu hutan dan mengurangi deforestasi • Periode panen cepst • Residu tanaman global diperkirakan 2802 juta ton/tahun untuk total tanaman sereal, 3107 juta ton/tahun untuk 17 sereal dan kacang-kacangan, dan 3758 juta ton/tahun untuk 27 tanaman pangan • Potensi hasil etanol adalah 235-450 L / ton biomassa
Biomassa dari limbah hutan	<ul style="list-style-type: none"> • Kadar abu yang lebih rendah dibandingkan dengan residu tanaman • Waktu panen yang fleksibel • Salah satu biomassa terbesar yang belum dieksploitasi dan kurang dimanfaatkan • Potensi hasil etanol adalah 220-275 L/ton untuk kayu lunak dan 280-285 L/ton untuk kayu keras

Dari ketiga sumber bahan baku yang dijelaskan, biomassa lignoselulosa adalah bahan yang terus dikembangkan. Biomassa tersebut dikembangkan untuk mengurangi limbah dan mengubahnya menjadi bioenergi maupun material yang bermanfaat.



C. Selulosa, Hemiselulosa dan lignin dalam Biomassa Lignoselulosa

Biomassa lignoselulosa mengandung jumlah selulosa, hemiselulosa dan lignin yang bervariasi tergantung pada jenis biomassa. Dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Persentase Selulosa, Hemiselulosa dan Lignin pada biomassa lignoselulosa[13].

Biomassa	Selulosa (%)	Hemiselulosa (%)	Lignin (%)
Rumput Gajah	5-20	30-50	10-40
Miscanthus	38-40	18-24	24-25
Koran	40-55	25-40	18-30
Tongkol Jagung	42-45	35-39	14-15
Ampas Tebu	42-48	19-25	20-42
Jerami	28-36	23-28	12-14
Kayu Lunak	27-3	35-40	25-30

Selulosa dan hemiselulosa membentuk sekitar 2/3 dari total berat kering biomassa yang merupakan substrat utama untuk etanol[31]. Selulosa adalah struktur linier dan kristal yang mengandung rantai linier unit glukosa dan bergabung bersama oleh $\beta - 1 \rightarrow 4 - glucosidic linkage$, dengan berat molekul rata-rata sekitar 100.000 Da[32]. Struktur eksplisit dari selulosa menghasilkan kristalinitas yang tinggi, sehingga menyebabkan ketidaklarutan polimer selulosa terhadap air dan tahan terhadap depolimerisasi[33].

Hemiselulosa adalah heteropolimer dengan berat molekul rata-rata hampir 30.000 Da. Hemiselulosa terdiri dari rantai pendek, linier dan sangat bercabang

omer yang berbeda termasuk heksosa (β -D-glukosa, α -D-galaktosa dan nose), pentosa (β -D-xilosa, dan α -L-arabinosa). Rantai hemiselulosa juga mengandung asam gula (asam uronat) yaitu, α -D-glukuronat, α -D-



galakturonat dan asam α -D-4-O-metilgalakturonat, yang tetap terkait dengan selulosa di dinding sel tanaman[32], [34].

Lignin adalah polimer aromatik bercabang yang terdapat di dinding sel tanaman, dan terikat dengan polimer selulosa membentuk matriks lignoselulosa[13]. Monomer polimer lignin adalah tiga senyawa fenolik seperti *coumaryl*, *coniferyl* dan *sinapyl* alkohol[34].

Salah satu biomassa lignoselulosa yang dikembangkan untuk produksi bioetanol adalah ampas tebu. Ampas tebu secara global sangat melimpah sehingga para peneliti mengembangkan proses pengolahannya.

D. Ampas Tebu (*Sugarcane bagasse*)

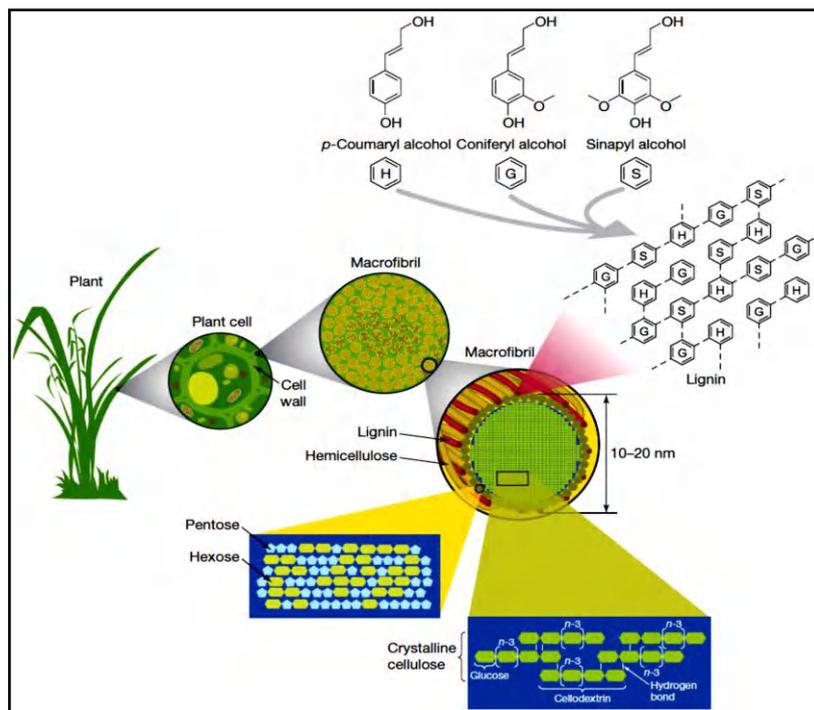
Tebu termasuk dalam kelompok *Poaceae*, yang merupakan rumput. Jaringan dalam tanaman ini terdiri dari sel dengan tipe Dinding sel II, artinya serat selulosa berada dalam matriks *glucurono-arabino-xylan* dengan tingkat hidroksisinamat tinggi. Saat tebu matang, dinding sel sekunder dibuat antara dinding sel primer dan membran plasma, yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa (terutama glukuronoarabinoksi), dan lignin[5].

Rumus kimia selulosa adalah $(C_6H_{10}O_5)_n$, di mana n disebut derajat polimerisasi (DP), mewakili jumlah unit glukosa, yang dapat berkisar dari ratusan hingga ribuan, atau bahkan puluhan ribu unit glukosa dehidrasi. Rantai selulosa

secara tepat dikumpulkan menggunakan jaringan ikatan hidrogen dan ikatan kovalen yang kuat dan kompleks dan gaya *van der waals* untuk membentuk



inti kristal dari *elementary fibril*. Gugus hidroksil dari rantai selulosa membentuk ikatan kovalen dengan hemiselulosa *elementary fibril*. Matriks lignin menjalin hemiselulosa dan membungkus *elementary fibril* untuk membentuk microfibril [5]. Gambaran struktur tersebut dapat dilihat pada gambar 3.

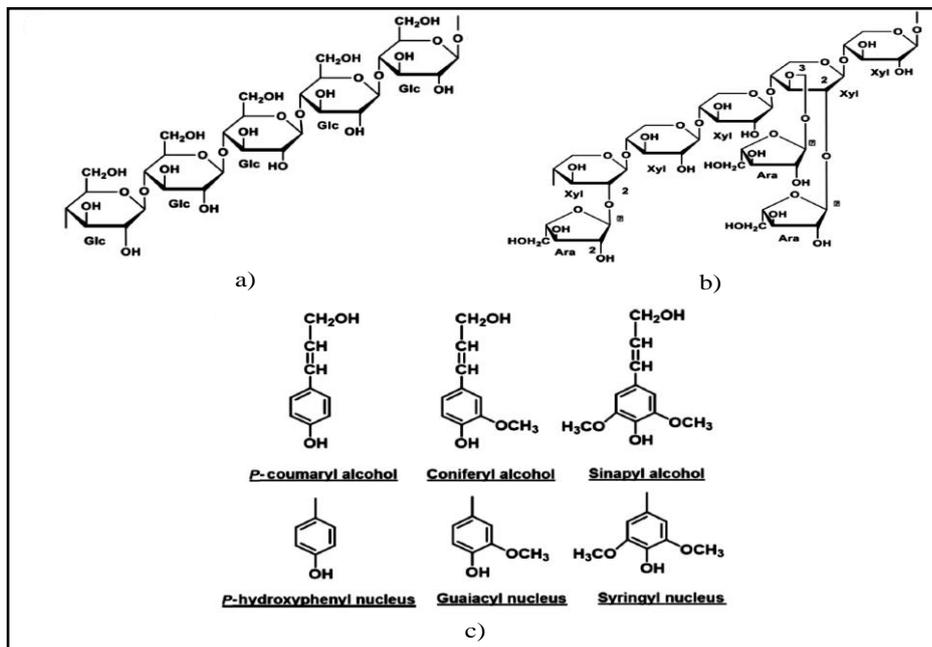


Gambar 3. Skema Selulosa, hemiselulosa dan lignin dalam lignoselulosa pada skala *macrofibril, microfibril, dan elementary fibril*[35].

Selulosa adalah homopolimer linier yang terdiri dari unit *d-glukopiranososa* yang dihubungkan oleh ikatan α -1, 4-glikosidik untuk membentuk *selobiosa dimer subunit*, yang saling terhubung dalam membentuk selulosa[35]. Hemiselulosa terdiri sekitar 50-200 unit heteropolimer dalam tebu yang sangat bercabang (terutama *d-xilosa*, diikuti *d-glukosa*, dan kemudian *l-arabinosa*) dan unit *d-galaktosa* yang lebih rendah. Dalam ampas tebu: arabinoxylan (AX) hemiselulosa paling banyak yang terhubung dengan β - (1 \rightarrow 4) dan D- atau 3-O- α -l-arabinose[5]. Lignin adalah senyawa organik (aromatik)



ketiga paling melimpah di ampas tebu, setelah selulosa dan hemiselulosa. Di dinding sel tebu, *tiga monolignol*, *P-coumaryl alkohol*, *coniferyl alkohol*, dan *sinapyl alkohol*, dipolimerisasi dengan reaksi radikal untuk membentuk polimer aromatik heterogen dalam lignin[36]. Struktur ikatan selulosa, hemiselulosa dan lignin dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. Struktur Kimia Selulosa (a), Hemiselulosa (b), dan Lignin (c) Pada Ampas Tebu[5]

Proses treatment ampas tebu saat ini menggunakan metode kimia yakni hidrolisis asam. Tujuan metode tersebut untuk memisahkan struktur lignin dan hemiselulosa dalam ampas tebu serta merubah struktur serat selulosa menjadi gula reduksi sehingga dapat dilakukan proses fermentasi dalam pembuatan bioetanol.

E. *Pre-treatment* Ampas Tebu

Ampas tebu merupakan bahan produksi bioetanol yang tergolong *second generation*. Adapun prosesnya yang melalui pretreatment terlebih dahulu untuk menghilangkan lignin dan memastikan aksesibilitas enzim ke selulosa dan hemiselulosa. Kemudian dilakukan hidrolisis polimer karbohidrat untuk menghasilkan gula reduksi (heksosa, pentosa dan glukosa) untuk difermentasi. Terakhir, dilakukan fermentasi heksosa dan pentosa untuk menghasilkan etanol, dan pemurnian melalui distilasi etanol [37]. Terdapat beberapa proses pretreatment yakni secara fisika dan kimia ataupun gabungan keduanya. Proses *pretreatment* secara fisika dilakukan dengan mekanisme penghancuran yakni ball milling (BM) dan wet disk milling (WDM) untuk mengurangi kristalinitas selulosa dalam ampas tebu. Proses BM memiliki optimasi dalam meningkatkan glukosa sebesar 78,7% dan 72,1% sedangkan WDM sebesar 49,3% dan 36,7%. Namun kedua proses tersebut mengkonsumsi 48 MJ / kg energi dalam prosesnya sehingga membutuhkan biaya yang mahal dan tidak layak untuk digunakan dalam industri[38]. Proses *pretreatment* secara kimia dilakukan dengan metode *Steam Explosion* (SE) dan *Acid Hydrolysis* (AH) yang mana mampu mengurangi hemiselulosa dalam ampas tebu masing-masing sebesar 58% dan 0,31% serta lignin sebesar 90,83% dan 96% [39]. Adapun proses pretreatment menggunakan larutan alkali yang mampu menurunkan kandungan lignin sekitar 72% [40].

Proses *pretreatment* gabungan fisika dan kimia salah satunya dengan akan gelombang mikro dan larutan kimia (H_2SO_4 dan NaOH). Proses dapat dilakukan dengan efisien dan efektif dikarenakan mampu



menurunkann seluruh hemiselulosa dalam ampas tebu dengan waktu 5 menit. Hasilnya mampu meningkatkan produksi bioetanol hingga 32,6%[5].

Disamping untuk meningkatkan kandungan glukosa maupun gula reduksi, beberapa metode pretreatment tersebut juga digunakan untuk memproduksi nano material yakni nano selulosa.

F. Nanopartikel Selulosa

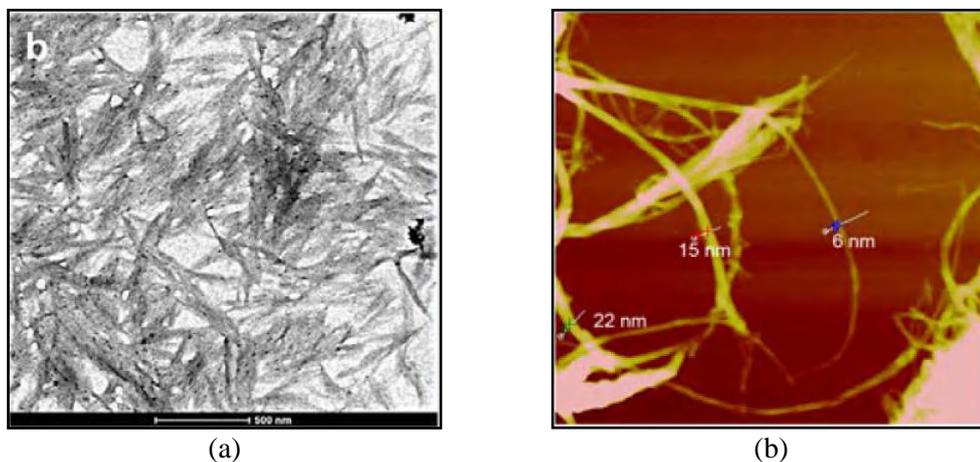
Biopolimer atau polisakarida alami misal Pati, selulosa, dan gelatin semakin populer sebagai bahan prekursor untuk pembuatan nanopartikel karena tidak beracun, biodegradable, biokompatibel, dan biaya pembuatan rendah. Di antara biopolimer-biopolimer ini, selulosa sangat menarik karena banyak tersedia, terbarukan, dan dapat diperoleh dari berbagai sumber daya alam seperti kayu, kapas, jerami gandum, sabut kelapa, ampas tebu, kulit tebu, kulit wijen, serat rami, dan pisang rachis[41].

Ampas tebu, seperti biomassa lignoselulosa lainnya, sebagian besar terdiri dari polisakarida (selulosa dan hemiselulosa) dan lignin. selulosa dapat menyebabkan partikel berukuran nanometer memiliki setidaknya satu dimensi, diameter atau panjangnya, kurang dari 100 nm[42]. Partikel-partikel ini disebut nano selulosa, dan dibagi menjadi tiga jenis yakni *cellulose nanocrystals* (CNC), *cellulose nanofibrils* (CNF), dan *cellulosa nanoparticle* (CNP) yang dihasilkan dari tanaman lignoselulosa seperti ampas tebu [43]. *Nanocrystals* memiliki kristal terbaik dan modulus yang tinggi, mendekati modulus teoritis Selulosa nano-kristal dihasilkan melalui proses hidrolisis asam maupun



enzimatik dengan menggunakan katalis untuk memisahkan ikatan glikosidik pada selulosa. Dari proses pemisahan tersebut, akan dihasilkan material dengan tingkat kristal yang tinggi yang disebut CNC (*Cellulose Nanocrystal*)[43]. Diameter CNC yang dihasilkan dari ampas tebu dapat bervariasi dari 20 – 60 nm dengan panjang sekitar 250 – 480 nm (gambar 5a)[44].

Nanofibrils adalah serat yang mengandung daerah amorf dan kristal yang mampu untuk mengikat jaringan lain. Nanofibril selulosa (CNF) adalah partikel yang panjang dari serat selulosa yang memiliki daerah kristal dan non-kristal. Diameter CNF yang dihasilkan dari ampas tebu dapat bervariasi dari 2 – 60 nm dengan panjang sekitar beberapa mikrometer (gambar 5b). Sehingga CNF memiliki aspek rasio yang tinggi (panjang/diameter)[45], [46].



Gambar 5. CNC (a) dan CNF (b) dari Ampas Tebu [44], [46].

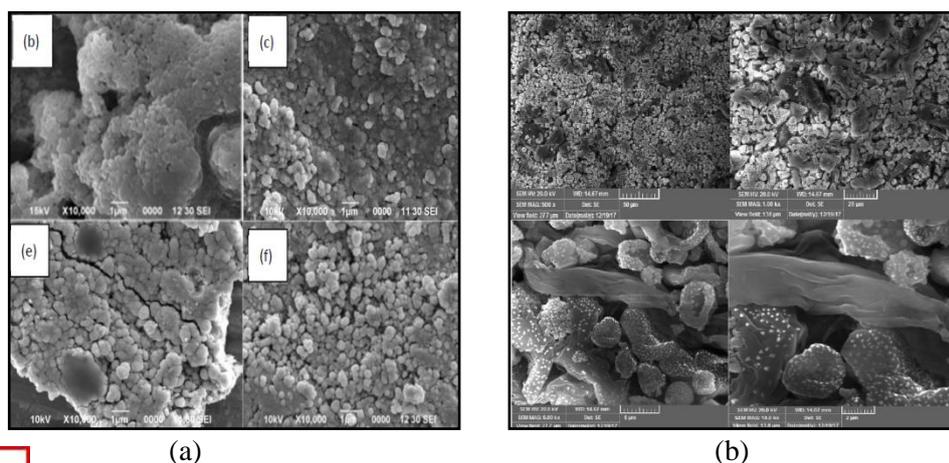
CNC dapat diekstraksi dari ampas tebu yang mana digunakan sebagai

dalam matriks polimer hidrofilik dengan memodifikasi permukaan CNC dengan asam lemak. CNC yang dimodifikasi berinteraksi lebih baik dengan



matriks hidrofobik[47]. CNF yang dihasilkan dari ampas tebu memiliki kekuatan tarik basah dan kering yang lebih baik dibandingkan dengan CNF dari jerami[46]. Nanoselulosa atau nanopartikel selulosa juga menghasilkan struktur unik yang dapat digunakan dalam material komposit sehingga meningkatkan karakteristik dan menghasilkan fungsi baru pada bahan[48].

CNP memiliki potensi besar dalam berbagai aplikasi seperti treatment tubuh, makanan, elektronik, dan obat-obatan karena sifatnya yang khas. Namun, penelitian tentang pembuatan nanopartikel selulosa relatif jarang dibandingkan dengan nanopartikel berbasis polisakarida lainnya seperti kitosan, alginat, dan dekstran. CNP memiliki diameter partikel rata-rata berkisar antara 30 hingga 120 nm yang dihasilkan dari limbah sekam wijen melalui proses hidrolisis asam[49]. Nanopartikel selulosa (CNP) saat ini juga telah dihasilkan dari kapas dan kentang dengan diameter partikel rata-rata berkisar antara 70 – 365 nm dan 100 – 200 nm (gambar 6) [41], [50].



Gambar 6. Bentuk CNP dari kapas (a) dan kentang (b) [41], [50].



Saat ini perkembangan metode untuk menghasilkan nano material dapat menggunakan teknologi plasma. Teknologi plasma telah banyak digunakan dalam pembuatan bahan nano, terutama teknik tekanan rendah seperti *Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PE-CVD). Berbeda dengan plasma bertekanan rendah, teknologi plasma atmosfer juga dapat digunakan untuk menghasilkan nano material dalam kondisi tekanan 1 atm. Karena keuntungan beroperasi di udara, plasma atmosfer dapat menghasilkan jumlah spesies oksigen dan nitrogen reaktif (RONS) yang tinggi, yang secara langsung dapat mengurangi ion logam dalam cairan untuk membentuk nanopartikel logam (NP), tanpa adanya zat pereduksi tambahan. Dengan demikian, metode ini juga dianggap sebagai metode "ramah lingkungan" untuk pembuatan nano material[51].

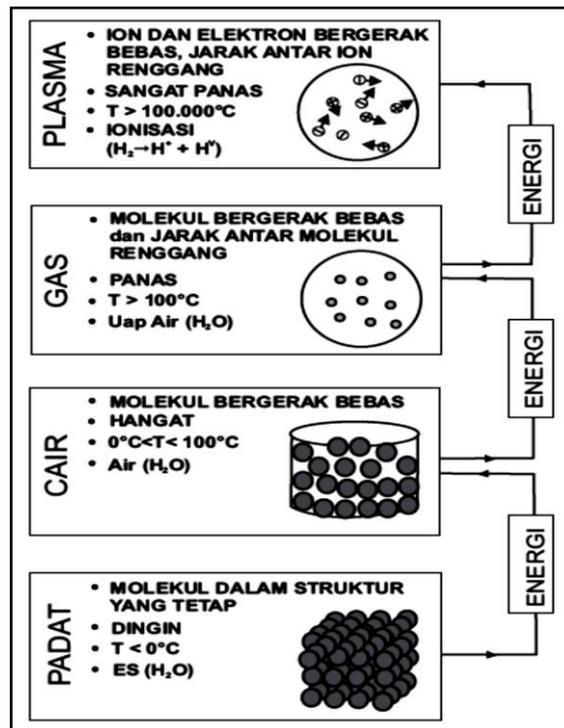
G. Teknologi Plasma dan Aplikasinya

Konsep tentang plasma pertama kali dikemukakan oleh Langmuir dan Tonks pada tahun 1928. Mereka mendefinisikan plasma sebagai gas yang terionisasi dalam lucutan listrik, jadi plasma dapat juga didefinisikan sebagai campuran kuasinetral dari elektron, radikal, ion positif dan negatif. Maka secara sederhana plasma didefinisikan sebagai gas terionisasi dan dikenal sebagai fase materi ke empat setelah fase padat, cair, dan fase gas (gambar 7) [52].

Menurut Chen (2002), plasma merupakan daerah reaksi tumbukan elektron yang sangat signifikan untuk terjadi. Plasma dapat terjadi ketika suhu atau energi dinaikkan sehingga memungkinkan atom-atom gas terionisasi akan



membuat gas tersebut melepaskan elektron-elektronnya yang pada keadaan normal mengelilingi inti[53].



Gambar 7. Ilustrasi fase materi keempat setelah fase padat, cair dan gas[52].

Plasma menghasilkan suhu elektron yang sangat tinggi sekitar $10^3 \sim 10^4 \text{K}$. Berdasarkan suhu elektron, plasma dapat dibagi menjadi *low thermal plasma* dan *high thermal plasma* (tabel 6)[54].

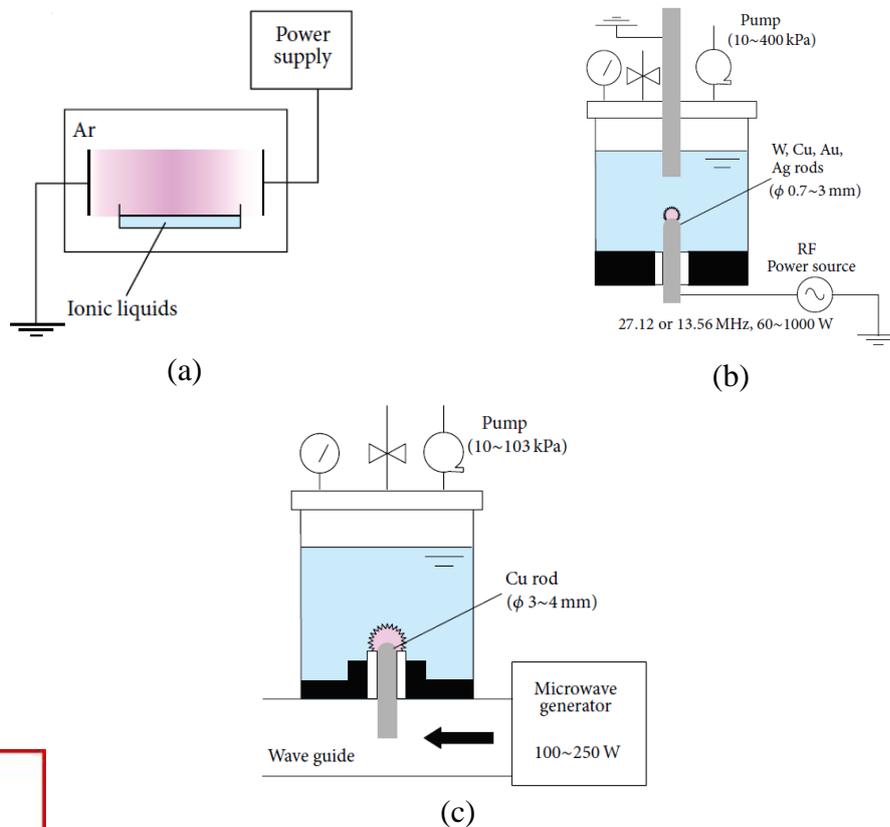
Tabel 6. Jenis-jenis Plasma[54].

<i>Low-temperature Plasma</i>		<i>High-temperature Plasma</i>
<i>Thermal Plasma</i>	<i>Non-thermal Plasma</i>	
$T_e \approx T_i$	$T_i \ll T_e \sim 10^4 \text{K}$	$T_i \approx T_e > 10^7 \text{K}$
$\approx T_g \sim 10^4 \text{K}$	$n_e \leq 10^{20} \text{m}^{-3}$	$n_e \geq 10^{20} \text{m}^{-3}$
$n_e \sim 10^{20} \text{m}^{-3}$	Warm Plasma	Cold Plasma
	$T_g \sim 10^3 \text{K}$	$T_g \sim 10^2 \text{K}$

T_e = electron Temperature T_i = ion Temperature T_g = gas Temperature
n_e = electron density



Dengan suhu elektron tersebut, plasma dapat menghasilkan spesies reaktif seperti elektron, ion, dan radikal bebas yang dapat digunakan dalam reaksi kimia. Sumber energi untuk membangkitkan plasma yakni *high voltage* (HV), *radio frequency* (RF) dan *microwave plasma source* (MPS) dengan operasi daya mulai dari 1 kW - 50 MW [55]. Umumnya, plasma sangat mudah dibangkitkan pada fase gas. Namun, saat ini plasma dapat pula dibangkitkan dalam fase cair dengan sumber yang sama untuk membangkitkan plasma dalam fase gas (gambar 8)[56]. Metode plasma dalam fase cair dihasilkan di dalam gelembung-gelembung dalam cairan dan menyebabkan terjadinya reaksi kimia bersuhu tinggi yang disuplai ke cairan tersebut[57].



Gambar 8. HV (a), RF (b) dan MW (c) plasma dalam fase cair [58].



Metode plasma dalam fase cair telah diaplikasikan dalam proses dekomposisi senyawa kimia. Hal ini dikarenakan plasma memiliki suhu elektron yang tinggi sehingga mampu menghasilkan spesies aktif seperti H_2O_2 , O , OH , O^* , HO_2 , O_3^* , N_2^* , e^- , O_2^- , O^- , O_2^+ [59]. Spesies aktif tersebut akan bereaksi dengan senyawa lain seperti senyawa organik maupun non-organik. Baroch, dkk telah menjelaskan bahwa proses pengolahan limbah cair dengan memanfaatkan plasma DC pada input 1 kV mampu mendekomposisi senyawa organik [59]. Plasma dalam cairan juga menghasilkan suhu eksitasi yang tinggi sehingga dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan nano material. Novriany Amaliyah, dkk telah menjelaskan bahwa nanopartikel seng telah dihasilkan dari bubuk seng oksida (ZnO) melalui proses microwave plasma 2,45 GHz dalam cairan etanol, yang bertindak sebagai agen pereduksi. Nanopartikel dalam bentuk kubik dan heksagonal sekitar 30 hingga 200 nm[60].

