

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permasalahan sampah sisa makanan (*food waste*) menjadi isu lingkungan yang semakin serius di berbagai negara termasuk Indonesia. Laporan *Barilla Center For Food and Nutrition* menyebutkan Indonesia menjadi negara penyumbang sampah makanan nomor dua dunia sebanyak 13 juta ton makanan/tahun (Lestari et al., 2015). Berdasarkan data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) Indonesia pada tahun 2025 sebanyak 39,71% timbulan sampah di Indonesia merupakan sampah sisa makanan (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2026).

Timbulan sampah sisa makanan yang terus meningkat dapat menyebabkan berbagai permasalahan lingkungan, seperti emisi gas metana (CH_4) dari proses pembusukan di TPA, pencemaran tanah dan air oleh lindi, serta peningkatan beban kapasitas tempat pemrosesan akhir (TPA) (Citrasari et al., 2025). Padahal sampah sisa makanan mengandung bahan organik yang berpotensi diolah menjadi berbagai produk bernilai, seperti kompos, pakan ternak, biogas, maupun bioetanol (Ulfah et al., 2023)

Permasalahan timbulan sampah sisa makanan diperkirakan akan meningkat dengan adanya Program Makan Bergizi Gratis (MBG). Kajian Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas) menunjukkan sampah sisa makanan dari program Makan Bergizi Gratis (MBG) mencapai 1,1 - 1,4 juta ton per tahun. Dari jumlah tersebut, 451 - 603 ribu ton diantaranya merupakan *edible food* atau makanan yang sebenarnya masih bisa dikonsumsi (Lingga. U & Elly. M, 2025). Dengan begitu timbulan sampah sisa makanan di Indonesia dapat meningkat tiap tahunnya. Oleh karena itu, diperlukan upaya pengelolaan sampah sisa makanan yang efektif dan berkelanjutan agar tidak menjadi permasalahan lingkungan.

Salah satu alternatif pengolahan sampah sisa makanan adalah dengan memanfaatkannya sebagai bahan baku produksi bioetanol. Bioetanol merupakan cairan biokimia hasil proses fermentasi gula dari karbohidrat dengan bantuan

mikroorganisme (Zahriani & Sutjahjo, 2013). Sampah sisa makanan program MBG memiliki kandungan bahan organik dan karbohidrat cukup tinggi sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai substrat dalam produksi bioetanol.

Selain sampah sisa makanan, bahan organik lain yang berpotensi digunakan sebagai substrat produksi bioetanol adalah *sludge* industri pangan. *Sludge* industri pangan diambil dari residu hasil proses produksi yang masih mengandung bahan organik berupa karbohidrat, protein, dan senyawa organik lainnya (Sharma, 2022). Pemanfaatan *sludge* industri pangan sebagai bahan baku tambahan tidak hanya membantu mengurangi limbah industri, tetapi juga berpotensi meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi mikroorganisme selama produksi bioetanol.

Produksi bioetanol umumnya meliputi beberapa tahapan, seperti *pretreatment*, hidrolisis, fermentasi, dan distilasi (Edeh, 2020). Namun, proses distilasi memiliki keterbatasan karena adanya fenomena azeotrop etanol-air yang menyebabkan kadar etanol maksimum mencapai sekitar 95% (Bušić et al., 2018). Oleh karena itu, diperlukan proses lanjutan berupa dehidrasi untuk menghilangkan kandungan air dari bioetanol hasil distilasi (biasanya 90 - 95%) menjadi kadar bahan bakar dengan kemurnian tinggi (Zhao et al., 2021).

Berbagai metode dehidrasi telah dikembangkan dengan penggunaan adsorben, misalnya silika gel, dan zeolit. Menurut penelitian Vinata et al., (2025) menunjukkan bahwa adsorpsi silika gel sangat efektif dalam meningkatkan kemurnian etanol, dengan konsentrasi tertinggi sebesar 99,8% diperoleh menggunakan alkoholmeter dengan 60 gram adsorben. Di sisi lain penelitian oleh Ibrahim et al., (2022) membuktikan bahwa adsorpsi dengan menggunakan zeolit 3A sebagai kelanjutan dari proses distilasi berhasil meningkatkan konsentrasi bioetanol menjadi 99,54%. Selain itu, metode kombinasi distilasi dan adsorpsi terbukti efektif dalam menghasilkan bioetanol berkualitas bahan bakar.

Berbagai penelitian telah mengkaji produksi bioetanol dari sampah sisa makanan (*food waste*) maupun *sludge* industri pangan secara terpisah. Namun, penelitian mengenai pemanfaatan kombinasi kedua substrat tersebut sebagai bahan baku bioetanol masih terbatas. Selain itu, kajian mengenai proses dehidrasi bioetanol umumnya hanya berfokus pada penggunaan satu jenis adsorben tanpa

membandingkan efektivitas adsorben yang berbeda. Hingga saat ini, masih belum banyak penelitian yang membandingkan efektivitas adsorben zeolit dan silika gel pada proses dehidrasi bioetanol dari campuran sampah sisa makanan dan *sludge* industri pangan.

Dengan demikian, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh rasio campuran sampah sisa makanan (*food waste*) dan *sludge* industri pangan terhadap produksi bioetanol serta efektivitas adsorben zeolit dan silika gel dalam pemurnian bioetanol. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi pengolahan limbah yang lebih berkelanjutan serta pemanfaatan limbah menjadi sumber energi alternatif.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh variasi komposisi sampah sisa makanan (*food waste*) dan *sludge* industri pangan terhadap kadar etanol yang dihasilkan ?
2. Bagaimana efektivitas adsorben (zeolit dan silika gel) dalam proses dehidrasi bioetanol ?
3. Kombinasi substrat dan jenis adsorben mana yang menghasilkan bioetanol paling optimal ?
4. Apakah karakteristik bioetanol yang dihasilkan telah memenuhi standar mutu berdasarkan SNI 7390:2012 ?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis pengaruh variasi komposisi sampah sisa makanan (*food waste*) dan *sludge* industri pangan terhadap kadar etanol yang dihasilkan.
2. Menganalisis efektivitas adsorben (zeolit dan silika gel) dalam proses dehidrasi bioetanol
3. Menganalisis kombinasi perlakuan terbaik (komposisi substrat dan jenis adsorben) untuk produksi bioetanol.

4. Menilai kesesuaian karakteristik bioetanol yang dihasilkan dengan standar mutu yang ditetapkan dalam SNI 7390:2012.

1.4 Manfaat

Adapun manfaat yang diharapkan pada penelitian kali ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi produksi bioetanol dari limbah organik.
2. Memberikan alternatif pemanfaatan *sludge* industri pangan dan sampah sisa makanan (*food waste*) menjadi energi terbarukan.
3. Mengurangi pencemaran limbah organik melalui konversi menjadi produk bernilai guna.
4. Memberikan referensi untuk industri pangan dalam pengolahan limbah berbasis sustainability.

1.5 Lingkup Penelitian

a. Objek Penelitian

Objek penelitian dalam penelitian ini adalah sampah sisa makanan yang dihasilkan dari program Makan Bergizi Gratis (MBG) di salah satu SPPG Surabaya dan *sludge* industri pangan dari salah satu industri di Gresik yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku produksi bioetanol. Sampah sisa makanan yang diteliti hanyalah sisa nasi, kulit buah - buahan yang memiliki karbohidrat, pati, dan gula untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif.

b. Aspek Teknis yang Dikaji

Aspek teknis yang dikaji dalam penelitian ini meliputi :

1. Komposisi bahan baku produksi bioetanol
2. Adsorben yang dipakai dalam proses dehidrasi bioetanol
3. Kadar etanol, yield etanol, densitas, kadar air, *octane number*, dan standar mutu bioetanol pada SNI 7390:2012

c. Pendekatan Penelitian

Pendekatan penelitian kuantitatif dengan menghitung perbandingan komposisi bahan baku bioetanol, proses bioetanol, adsorben yang digunakan dalam proses dehidrasi bioetanol, analisis laboratorium, serta pengolahan data dengan metode statistik sesuai rancangan eksperimen.

d. Waktu Penelitian

Waktu penelitian dalam penelitian ini dimulai pada tanggal 20 Juli hingga 30 Juli 2026 untuk produksi bioetanol dari *food waste* dan *sludge*. Sampling di SPPG sendiri dari tanggal 28 Juli hingga 6 Agustus 2026.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

2.1.1 Sampah Sisa Makanan (*Food Waste*)

Sampah sisa makanan (*food waste*) merupakan makanan yang masih layak untuk dikonsumsi, namun dibuang atau tidak dimanfaatkan untuk tujuan pangan. Hal tersebut dapat terjadi akibat berbagai faktor, seperti bahan makanan yang membusuk, kesalahan dalam penyimpanan makanan, kelebihan produksi, kelalaian dalam pengelolaan makanan, maupun keputusan konsumen yang tidak menghabiskan makanan secara optimal. Fenomena *food waste* umumnya terjadi pada tahap akhir rantai pasok pangan, terutama pada tingkat rumah tangga, restoran, dan sektor ritel (Todd & Faour-Klingbeil, 2024).

Sampah sisa makanan (*food waste*) dihasilkan dari berbagai sektor yang terlibat rantai pasok pangan, yaitu sektor rumah tangga, restoran, hotel, pasar, industri pengolahan pangan, institusi pendidikan, dan program makan massal, seperti program Makanan Bergizi Gratis (MBG) (*United Nations Environment Programme*, 2024).



Gambar 2.1 Sampah Sisa Makanan

(*Sumber : Kompasiana, 2026*)

Sampah sisa makanan memiliki kandungan bahan organik yang tinggi dan mudah terdegradasi (*biodegradable*). Sampah sisa makanan memiliki beberapa

karakteristik fisik dan kimia yang membuatnya bermanfaat untuk diolah menjadi produk bernilai. Karakteristik tersebut dapat dilihat pada **Tabel 2.1** berikut.

Tabel 2.1 Karakteristik Sampah Sisa Makanan

No.	Parameter	Kisaran nilai
1.	Kadar air	74 - 90%
2.	Karbohidrat	41 - 62%
3.	Protein	15 - 25%
4.	Lipid	13 - 30%
5..	Rasio C/N	20 - 30

(Sumber : Slopiecka et al, 2022)

Sampah sisa makanan yang tidak dikelola dengan baik dapat menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan, seperti peningkatan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari proses dekomposisi bahan organik di Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Selain itu, *food waste* juga menimbulkan kerugian ekonomi karena menyebabkan pemborosan sumber daya yang digunakan dalam proses produksi pangan seperti air, energi, dan lahan pertanian. Dari sisi sosial, tingginya tingkat sampah sisa makanan juga berpotensi mempengaruhi ketahanan pangan global karena masih banyak masyarakat yang mengalami keterbatasan akses terhadap pangan (Bibra et al., 2023).

Sampah sisa makanan (*food waste*) memiliki potensi untuk dimanfaatkan menjadi sumber daya yang bernilai ekonomi, seperti :

- Kompos

Pengolahan *food waste* melalui proses pengomposan menghasilkan pupuk organik yang dapat meningkatkan kesuburan tanah dan memperbaiki struktur tanah (Ulfah et al., 2023).

- Biogas

Sampah sisa makanan mengandung bahan organik dan mudah terdegradasi yang dapat dimanfaatkan sebagai substrat pada proses digesti

anaerobik untuk menghasilkan biogas yang kaya metana (Ulfah et al., 2023).

- Bioetanol

Kandungan karbohidrat yang tinggi memungkinkan *food waste* dikonversi menjadi bioetanol melalui tahapan hidrolisis, fermentasi, dan distilasi. Karbohidrat kompleks diubah menjadi gula sederhana yang kemudian difermentasi oleh *Saccharomyces cerevisiae* menjadi etanol (Kazemi Shariat Panahi et al., 2022).

2.1.2 Program Makan Bergizi Gratis (MBG)

Program Makan Bergizi Gratis (MBG) merupakan salah satu program prioritas nasional yang diselenggarakan oleh pemerintah Indonesia melalui Badan Gizi Nasional untuk meningkatkan status gizi masyarakat, khususnya kelompok rentan seperti peserta didik, balita, ibu hamil, dan ibu menyusui (Kevin Andreas et al., 2025). Pelaksanaan program Makan Bergizi Gratis (MBG) dimulai pada 6 Januari 2025 melalui Satuan Pelayanan Pemenuhan Gizi (SPPG). Saat ini, total SPPG (Satuan Pelayanan Pemenuhan Gizi) yang beroperasi di seluruh Indonesia berjumlah 29.991 unit (Badan Gizi Nasional, 2026).

Namun Pelaksanaan program nasional seperti MBG ini juga memunculkan masalah lingkungan. Dibalik manfaat dan tujuan kesehatannya, operasional Satuan Pelayanan Pemenuhan Gizi (SPPG) yang melayani ribuan porsi setiap hari berpotensi menghasilkan timbunan sampah dalam jumlah besar. Data dari JatimTimes menunjukkan peningkatan volume sampah organik sebesar 400 kg pada tiap titik SPPG kapasitas 2.000 porsi, dengan asumsi timbunan individu sebesar 0,5 kg/hari (Kurniawan, 2026).

Sampah sisa makanan MBG terjadi akibat banyak faktor seperti perencanaan menu yang tidak tepat, kesalahan dalam penyimpanan, hingga ketidaksesuaian antara jumlah makanan yang disiapkan dan jumlah penerima manfaat (Ibrahim Santoso & Mulyadi, 2025). Sampah sisa makanan MBG ini dianggap sebagai sampah tambahan karena tidak disertai dengan penurunan aktivitas memasak di rumah para siswa. Jika tidak dikelola dengan sistem yang tepat, sampah SPPG

akan menumpuk di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA), yang pada akhirnya justru menciptakan masalah kesehatan lingkungan baru bagi masyarakat.

2.1.3 *Sludge* Industri Pangan

Sludge merupakan residu padat atau semi-padat yang dihasilkan dari proses pengolahan limbah cair melalui sedimentasi, flotasi, maupun proses biologis di Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). *Sludge* terbentuk akibat akumulasi biomassa mikroorganisme, partikel organik tersuspensi, serta bahan terlarut yang mengalami presipitasi (Metcalf & Eddy, 2014).

Dalam industri pangan, *sludge* umumnya mengandung bahan organik tinggi berupa sisa karbohidrat, protein, dan lipid yang belum terdegradasi secara sempurna. Kandungan organik yang tinggi seperti protein, lemak, karbohidrat menggambarkan potensi biodegradabilitas dan nilai nutrisi *sludge* terutama pada industri penghasil produk makanan dan minuman (Rossi et al., 2023).



Gambar 2.2 *Sludge* Industri Pangan

(Sumber : Universal Eko, 2025)

Sludge industri pangan memiliki karakteristik yang kompleks, secara karakteristik fisiknya *sludge* meliputi kadar air (*moisture content*), warna, tekstur, dan bau. Kadar air yang tinggi ($>70\%$) berkontribusi terhadap pembentukan kondisi anaerob (Kaushik & Sharma, 2020). Karakteristik kimia pada *sludge* sendiri meliputi pH, kandungan nitrogen amonia (NH_3), sulfida (H_2S), serta senyawa volatil lainnya. Proses degradasi protein menghasilkan amonia, sedangkan reduksi sulfat menghasilkan hidrogen sulfida (Zhang et al., 2022),

sedangkan secara karakteristik biologis *sludge* didominasi mikroorganisme heterotrof dan anaerob yang berperan dalam fermentasi dan pembentukan senyawa volatil penyebab bau.

Kandungan nutrisi pada *sludge* industri pangan umumnya mengandung nitrogen (N), fosfor (P), dan karbon (C) dalam jumlah signifikan. Kandungan nutrisi ini menjadikannya berpotensi dan dapat dimanfaatkan sebagai substrat biomassa yang bernilai jual. Pemanfaatan menjadi bahan baku kompos, pupuk organik, bioetanol maupun media biokonversi larva *Black Soldier Fly* (BSF) (Kusumah et al, 2025).

Tabel 2.2 Karakteristik *Sludge* Industri Pangan

No.	Parameter	Hasil Pengukuran
1.	Kadar Air	88,69%
2.	Kadar Lemak	0,44%
3.	Kadar Protein	2,63%
4.	Karbohidrat	4,29%
5.	Rasio C/N	10,12

(Sumber : Handayani, 2021)

2.1.4 Bioetanol

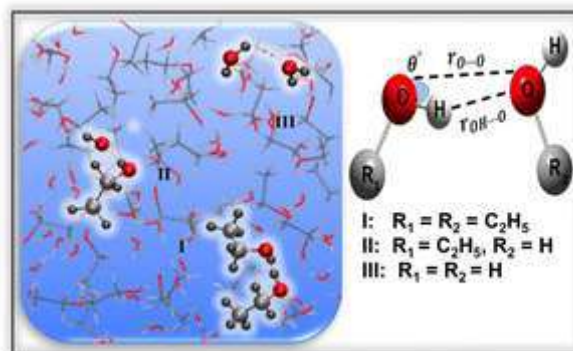
Bioetanol merupakan salah satu jenis bahan bakar alternatif yang dihasilkan dari biomassa melalui proses konversi biokimia. Biomassa yang digunakan sebagai bahan baku bioetanol umumnya berasal dari sumber daya terbarukan yang mengandung karbohidrat seperti gula, pati, dan lignoselulosa. Biomassa tersebut kemudian dikonversi menjadi gula sederhana dan difermentasi oleh mikroorganisme (Bušić et al., 2018).

Pemanfaatan *sludge* sebagai bahan baku bioetanol didasarkan pada kandungan senyawa organik yang masih dapat dikonversi menjadi gula fermentabel. Pada *sludge* industri makanan, sebagian besar bahan organik berasal dari pati, gula, dan komponen pangan lainnya yang belum terdegradasi sempurna selama proses

produksi. Setelah melalui tahap pretreatment dan hidrolisis, senyawa karbohidrat kompleks dapat diubah menjadi glukosa yang selanjutnya difermentasi menjadi etanol (Trisna et al., 2022).

Produksi bioetanol umumnya meliputi tahapan *pretreatment*, hidrolisis, fermentasi, dan distilasi. *Pretreatment* dilakukan untuk meningkatkan ketersediaan bahan organik sehingga lebih mudah diolah. Selanjutnya, hidrolisis mengubah karbohidrat kompleks menjadi gula sederhana yang kemudian difermentasi oleh mikroorganisme menjadi etanol (Edeh, 2020). Etanol yang dihasilkan selanjutnya dipisahkan melalui distilasi dan dimurnikan dengan proses lanjutan seperti dehidrasi untuk memperoleh kadar etanol yang lebih tinggi (Zhao et al., 2021).

Etanol (C_2H_5OH) merupakan senyawa alkohol yang memiliki gugus hidroksil ($-OH$) sehingga bersifat polar dan mampu berinteraksi dengan molekul air (H_2O) melalui ikatan hidrogen. Adanya gugus hidroksil tersebut menyebabkan etanol dapat bercampur sempurna (miscible) dengan air dalam berbagai perbandingan konsentrasi. Interaksi antara molekul etanol dan air membentuk jaringan ikatan hidrogen yang kompleks sehingga menghasilkan campuran homogen tanpa pemisahan fase. Ikatan hidrogen terbentuk ketika atom hidrogen yang terikat pada atom oksigen dalam molekul etanol berinteraksi dengan pasangan elektron bebas pada atom oksigen molekul air, atau sebaliknya. Interaksi ini menyebabkan molekul etanol dan air saling berasosiasi membentuk struktur jaringan tiga dimensi yang stabil (Pothoczki et al., 2021).



Gambar 2.3 Ikatan Hidrogen Etanol dan Air

(Sumber : Ghanghas & Vasudevan, 2022)

2.2 Landasan Teori

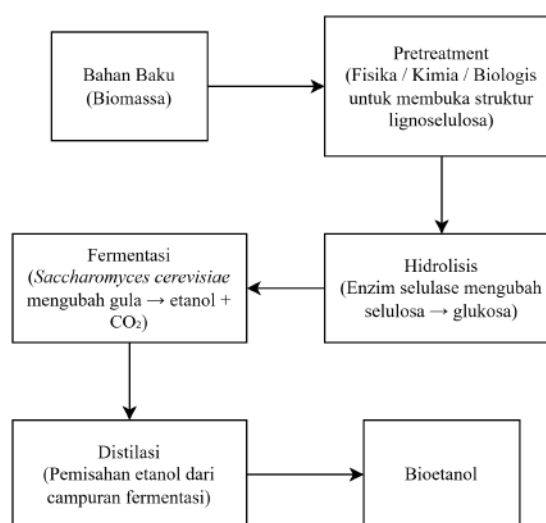
2.2.1 Konversi Sampah Menjadi Bioetanol

Konversi sampah organik menjadi bioetanol merupakan proses bioteknologi yang mengubah bahan organik yang mengandung karbohidrat menjadi etanol melalui serangkaian tahapan fisik, kimia, dan biologis. Sampah organik seperti sampah sisa makanan (*food waste*) memiliki potensi yang tinggi sebagai bahan baku bioetanol karena mengandung karbohidrat, pati, selulosa, hemiselulosa, serta sejumlah nutrisi yang dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme selama proses fermentasi (Panahi, 2022).

Prinsip dasar produksi bioetanol adalah mengonversi senyawa polisakarida menjadi gula sederhana yang selanjutnya difermentasi menjadi etanol oleh mikroorganisme seperti *Saccharomyces cerevisiae*. Proses ini umumnya terdiri atas beberapa tahapan utama yaitu *pretreatment*, hidrolisis, fermentasi, dan distilasi (Edeh, 2020).

2.2.2 Proses Produksi Bioetanol

Proses produksi bioetanol dari berbagai bahan baku meliputi *pretreatment*, hidrolisis, fermentasi, dan distilasi. Proses - proses tersebut dijelaskan di bawah ini :



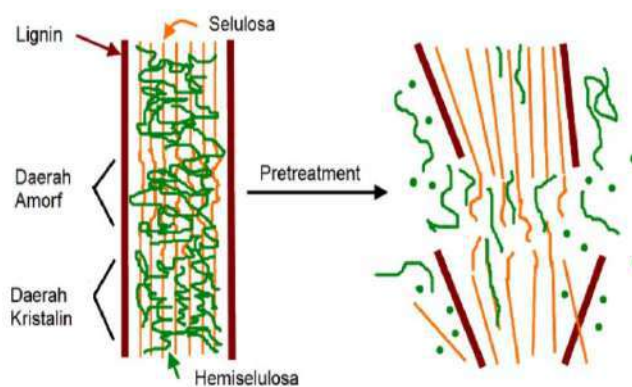
Gambar 2.4 Proses Produksi Bioetanol

(Sumber : Diolah oleh Penulis, 2026)

2.2.2.1 Pretreatment

Pretreatment merupakan tahap awal yang bertujuan untuk membantu melepaskan selulosa dari struktur kompleks biomassa sehingga komponen selulosa mudah diakses pada tahap hidrolisis. Tahap ini sangat penting terutama pada biomassa lignoselulosa karena adanya lignin yang berfungsi melindungi selulosa sehingga sulit terdegradasi secara langsung (Edeh, 2020).

Beberapa metode *pretreatment* yang umum digunakan antara lain pretreatment fisik, kimia, dan biologis. *Pretreatment* fisik dapat dilakukan melalui proses penggilingan atau radiasi sedangkan *pretreatment* kimia menggunakan bahan kimia seperti asam atau basa untuk memecah struktur lignoselulosa dengan menghilangkan lignin dan / hemiselulosa dari matriks biomassa. *Pretreatment* biologis memanfaatkan mikroorganisme seperti jamur pelapuk putih, pelapuk coklat, pelapuk lunak, serta beberapa jenis bakteri untuk mendegradasi struktur lignoselulosa sehingga mempermudah proses hidrolisis pada tahap selanjutnya (Edeh, 2020).



Gambar 2.5 Skema *Pretreatment* Lignoselulosa

(Sumber : Nurwahdaha et al., 2018)

2.2.2.2 Hidrolisis

Hidrolisis merupakan proses konversi polisakarida seperti pati atau selulosa menjadi gula sederhana yang dapat difermentasi. Proses ini adalah suatu proses yang memerlukan air dalam penguraian suatu senyawa. Berikut merupakan reaksi hidrolisis tersebut :

hidrolisis asam, waktu yang dibutuhkan relatif lebih singkat, yaitu sekitar beberapa jam. Sebagai contoh, hidrolisis menggunakan asam klorida menghasilkan kadar glukosa optimum pada waktu sekitar 6 jam, di mana semakin lama waktu reaksi akan meningkatkan hasil hingga batas maksimum sebelum akhirnya menurun akibat degradasi gula (Rizka Kumala, 2019).

2.2.2.3 Fermentasi

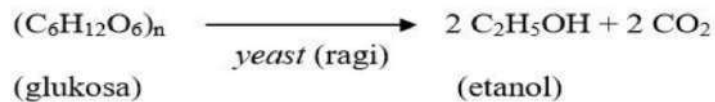
Fermentasi merupakan tahap konversi gula sederhana menjadi etanol oleh mikroorganisme dalam kondisi anaerob. Mikroorganisme yang paling umum digunakan dalam produksi bioetanol adalah ragi *Saccharomyces cerevisiae* karena memiliki kemampuan fermentasi yang tinggi serta toleransi yang baik terhadap konsentrasi etanol (Edeh, 2020). Beberapa contoh mikroorganisme berbeda yang digunakan dalam fermentasi gula sederhana dan hasil etanol masing - masing pada berbagai kondisi operasi dapat dilihat pada **Tabel 2.3** berikut.

Tabel 2.3 Mikroorganisme Fermentasi Bioetanol

Mikroorganisme		Suhu (°C)	pH	Waktu Fermentasi (Jam)	Hasil Etanol (g/L)
Ragi	Saccharomyces Cerevisiae 3013	30	5,5	65	130,12
	Saccharomyces Cerevisiae BY ₄₇₄₂	35	5	96	39
Bakteri	Zymomonas Mobilis NRRL 806	30	6,5	18	30,4
	Zymomonas Mobilis ZMA ₇₋₂	30	4	44	99,78

(Sumber : Edeh, 2020)

Pada proses fermentasi, mikroorganisme akan mengkonversi glukosa menjadi etanol dan karbondioksida melalui reaksi biokimia. Reaksi fermentasi tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :



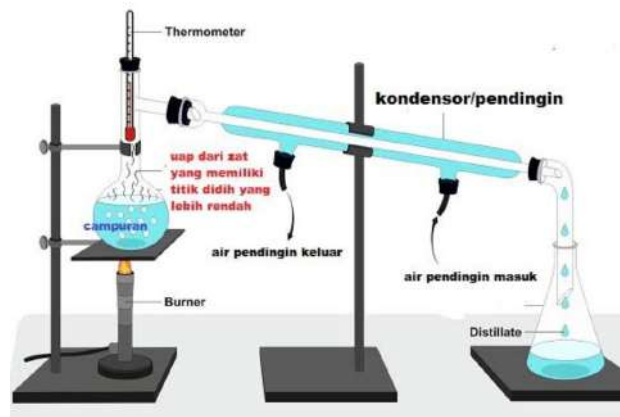
Gambar 2.8 Reaksi Fermentasi

(Sumber : Anugrah & Hendrasarie, 2021)

2.2.2.4 Distilasi

Distilasi merupakan salah satu tahap penting dalam proses produksi bioetanol yang berfungsi untuk memisahkan etanol dari campuran hasil fermentasi. Cairan hasil fermentasi biasanya hanya mengandung sekitar 8 - 12% etanol, sehingga diperlukan proses pemisahan untuk meningkatkan konsentrasi etanol hingga mendekati kemurnian bahan bakar. Distilasi bekerja berdasarkan perbedaan titik didih antara etanol dan air, dimana etanol memiliki titik didih sekitar 78,3°C, sedangkan air sekitar 100°C. Karena etanol memiliki titik didih yang lebih rendah, etanol akan menguap terlebih dahulu ketika campuran dipanaskan, kemudian uap tersebut dikondensasikan kembali untuk memperoleh etanol dengan konsentrasi yang lebih tinggi (Bušić et al., 2018).

Dalam proses produksi bioetanol, distilasi biasanya dilakukan menggunakan kolom distilasi fraksional yang memungkinkan pemisahan komponen secara bertahap. Uap etanol yang terbentuk akan naik ke bagian atas kolom, sedangkan air dan komponen lain yang memiliki titik didih lebih tinggi akan tertinggal di bagian bawah kolom (Tse et al., 2021).. Melalui proses ini, konsentrasi etanol dapat ditingkatkan hingga sekitar 95%. Namun, pada konsentrasi tersebut terbentuk azeotrop etanol-air, sehingga pemurnian lebih lanjut biasanya memerlukan proses tambahan seperti dehidrasi menggunakan molecular sieve atau metode distilasi ekstraktif (Edeh, 2020).



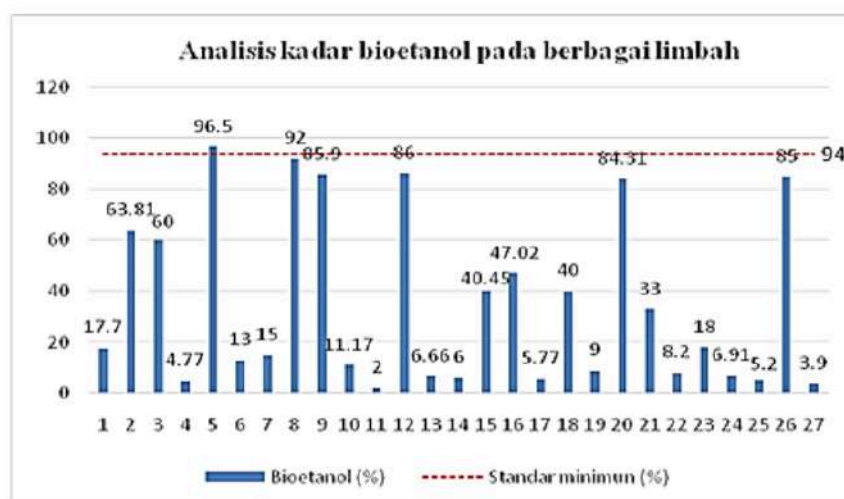
Gambar 2.9 Distilasi Fraksional

(Sumber :

<https://wayground.com/admin/quiz/5e9f1ef6b50ee8001b208318/pretest-praktikum-kimia-organik-destilasi-sederhana>)

2.2.3 Pengaruh Komposisi Substrat Terhadap Produksi Bioetanol

Komposisi bahan baku merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi produksi bioetanol karena menentukan jumlah substrat yang dapat dikonversi menjadi etanol selama proses fermentasi. Kandungan karbohidrat, protein, lemak, kadar air, dan nutrisi dalam bahan baku berperan dalam mendukung pertumbuhan mikroorganisme serta efisiensi konversi gula menjadi etanol (Supriyanti et al., 2023).



Gambar 2.10 Kadar Bioetanol dari Berbagai Substrat

(Sumber : Novelia et al., 2022)

Keterangan :

1. Kayu segon	10. Air cucian beras	19. Kulit buah sukun
2. Kulit kopi arabika	11. Serat kelapa sawit	20. Kulit delima
3. Kulit kopi robusta	12. Kulit pisang	21. Kurma
4. Ampas tahu	13. Tandan kelapa	22. Teh
5. Nasi basi	14. Kulit singkong	23. Kulit jeruk nipis
6. Sampah sayur (ragi tape)	15. Buah nanas	24. Koran
7. Sampah sayur (ragi roti)	16. Biji durian	25. Melon
8. Tepung tapioka	17. Sabut kelapa	26. Kulit mangga
9. Air agroindustri	18. Popok bayi	27. Nanas

Dalam penelitian ini, bahan baku yang digunakan adalah campuran sampah sisa makanan Program Makan Bergizi Gratis (MBG) dan *sludge* industri pangan. Sampah sisa makanan umumnya memiliki kandungan karbohidrat yang tinggi, terutama dari sisa nasi dan produk berbasis tepung, sehingga berpotensi menjadi sumber gula yang dapat difermentasi menjadi etanol (Fathoni & Bate'e, 2025). Sementara itu, *sludge* industri pangan masih mengandung bahan organik seperti karbohidrat, protein, dan lemak serta nutrisi yang dapat mendukung aktivitas mikroorganisme selama fermentasi (Sulistia et al., 2021).

Pencampuran sampah sisa makanan dan *sludge* industri makanan dapat menghasilkan keseimbangan antara sumber karbon dan nutrisi yang dibutuhkan mikroorganisme. Perbedaan komposisi campuran akan mempengaruhi kandungan bahan organik dan karbohidrat yang tersedia untuk dikonversi menjadi etanol selama proses fermentasi (Panahi et al., 2022).

Oleh karena itu, variasi komposisi sampah sisa makanan dan *sludge* industri makanan dapat menghasilkan perbedaan yield bioetanol yang diperoleh karena karakteristik bahan baku sangat mempengaruhi proses hidrolisis dan fermentasi (Bender et al., 2022). Selain mempengaruhi yield etanol, komposisi bahan baku juga berpengaruh terhadap konsentrasi etanol yang dihasilkan karena kadar etanol

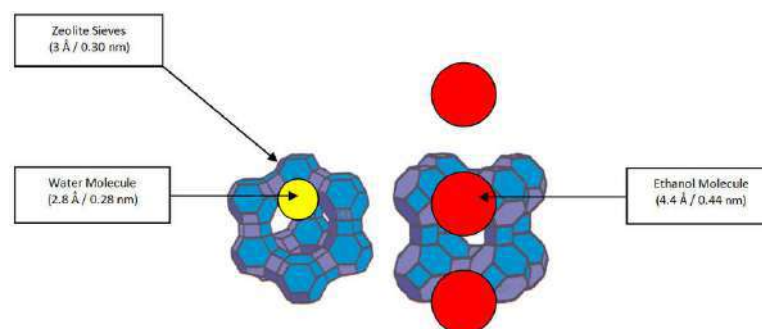
akhir berkaitan erat dengan karakteristik substrat dan kandungan bahan organik yang tersedia untuk fermentasi (Tsafara et al., 2022).

2.2.4 Dehidrasi Bioetanol

Dehidrasi bioetanol adalah proses pemurnian untuk menghilangkan kandungan air dari bioetanol hasil fermentasi / distilasi (biasanya 90 - 95%) menjadi kadar bahan bakar dengan kemurnian tinggi (anhidrat) (Zhao et al., 2021). Prinsip utama dehidrasi bioetanol adalah menghilangkan molekul air dari campuran etanol-air tanpa mengurangi kadar etanol secara signifikan. Proses ini dapat dilakukan melalui beberapa metode seperti adsorpsi, distilasi azeotropik, dan pemisahan berbasis membran (Fadhila Azzahra Putri, 2020).

a. Adsorpsi

Adsorpsi merupakan metode dehidrasi bioetanol yang bekerja dengan prinsip perpindahan massa, yaitu molekul air dalam campuran etanol-air akan menempel pada permukaan adsorben akibat adanya gaya fisik maupun interaksi kimia tertentu. Adsorben memiliki struktur berpori dengan luas permukaan yang besar sehingga mampu menangkap molekul air dari campuran bioetanol. Metode ini dilakukan dengan menggunakan material adsorben berpori seperti silika gel, zeolit, activated carbon, dan molecular sieve untuk menyerap molekul air dari campuran etanol-air (Fadhila Azzahra Putri, 2020).



Gambar 2.11 Adsorpsi Air dari Bioetanol

(Sumber : Patil, 2016)

b. Distilasi Azeotropik

Distilasi azeotropik merupakan metode pemisahan yang dilakukan dengan menambahkan komponen ketiga untuk memisahkan dua komponen yang memiliki titik didih berdekatan melalui pembentukan campuran azeotrop dengan salah satu komponen dalam campuran tersebut. Penambahan komponen ketiga bertujuan untuk meningkatkan perbedaan titik didih antar komponen sehingga proses pemisahan melalui distilasi menjadi lebih mudah. Zat ketiga yang umum digunakan antara lain benzena, sikloheksana, dan etilen glikol. Penambahan zat tersebut dapat mengubah karakteristik titik didih campuran etanol-air sehingga membantu proses pemisahan air dari etanol dan menghasilkan bioetanol dengan kemurnian yang lebih tinggi (Speight, 2020).

c. Pervaporasi

Pervaporasi merupakan salah satu metode dehidrasi bioetanol yang menggunakan membran selektif untuk memisahkan campuran cair berdasarkan perbedaan laju difusi komponen melalui membran. Pada proses ini, campuran etanol-air dialirkan ke permukaan membran, kemudian komponen akan melewati membran dan berubah menjadi fase uap pada sisi permeat akibat adanya perbedaan tekanan atau kondisi vakum. Membran yang digunakan pada proses pervaporasi bersifat hidrofilik sehingga lebih selektif terhadap molekul air dibandingkan etanol (Peng et al., 2021).

2.2.5 Adsorben

2.2.5.1 Zeolit 3A

Zeolit merupakan kristal aluminosilikat yang mengandung unsur golongan IA dan IIA seperti natrium, kalium, magnesium, dan kalsium. Struktur zeolit tersusun dalam bentuk tetrahedral yang membentuk rongga - rongga, sehingga dapat ditempati oleh kation maupun molekul air serta memungkinkan terjadinya pertukaran kation dan proses dehidrasi yang bersifat reversibel. Secara umum, zeolit terdiri atas tiga komponen utama, yaitu kation yang dapat dipertukarkan, kerangka aluminosilikat, dan kandungan air (Fadhila Azzahra Putri, 2020).

Pada proses dehidrasi bioetanol, campuran etanol-air hasil distilasi dikontakkan dengan zeolit. Molekul air yang memiliki ukuran sekitar 2,75 Å dapat masuk ke dalam pori zeolit tipe 3A dan teradsorpsi pada permukaan internal zeolit. Sementara itu, molekul etanol memiliki ukuran molekul sekitar 4,4 Å, sehingga tidak dapat masuk ke dalam pori zeolit dan tetap berada di luar adsorben (Hargono et al., 2023).



Gambar 2.12 Zeolit 3A

(Sumber : <https://www.jalonzeolite.com/product-item/zeolite-3a/>)

2.2.5.2 Silika Gel

Silika gel merupakan adsorben berpori yang banyak digunakan dalam proses dehidrasi bioetanol karena memiliki luas permukaan yang besar dan kemampuan adsorpsi air yang cukup tinggi. Silika gel tersusun atas silikon dioksida amorf (SiO_2) yang memiliki gugus silanol (Si-OH) pada permukaannya. Gugus silanol tersebut bersifat hidrofilik sehingga mampu menarik dan mengikat molekul air melalui ikatan hidrogen (Vinata et al., 2025).

Pemurnian etanol melalui proses adsorpsi menggunakan silika gel termasuk dalam jenis adsorpsi padat-cair. Pada proses ini silika gel berperan sebagai adsorben padat, sedangkan campuran etanol-air bertindak sebagai adsorbat cair. Mekanisme adsorpsi berlangsung melalui tiga tahapan utama, tahap pertama adalah perpindahan massa adsorbat dari fluida utama menuju permukaan luar adsorben melalui proses difusi. Tahap kedua melibatkan difusi adsorbat ke dalam pori - pori adsorben serta fase menyerap zat tersebut. Tahap terakhir merupakan proses penempelan zat terlarut pada situs aktif adsorben yang dapat berlangsung melalui mekanisme adsorpsi fisik maupun kimia (Vinata et al., 2025).



Gambar 2.13 Silika Gel

(Sumber : *The Editors of Encyclopaedia Britannica*, 2026)

2.2.6 Parameter Kualitas Bioetanol

Kualitas bioetanol merupakan salah satu aspek penting yang menentukan kelayakan bioetanol untuk digunakan sebagai bahan bakar alternatif. Di Indonesia, mutu bioetanol umumnya mengacu pada SNI 7390:2012 tentang Bioetanol Terdenaturasi untuk Gasohol yang dapat dilihat pada **Tabel 2.4** berikut.

Tabel 2.4 Standar Mutu Bioetanol (SNI 7390:2012)

No.	Parameter Uji	Standar	Metode Uji
1.	Kadar etanol	min. 94% (setelah didenaturasi dengan hidrokarbon)	ASTM D5501
2.	Kadar metanol	maks. 0,5%	ASTM D5501
3.	Kadar air	maks. 0,7%-v	ASTM D1744
4.	Kadar tembaga (Cu)	maks. 0,1 mg/kg	ASTM D1688
5.	Keasaman asam asetat	maks. 30 mg/l	ASTM D1613
6.	Tampakan	jernih dan terang, tidak ada endapan dan kotoran	Pengamatan visual
7.	Kadar ion klorida (Cl)	maks. 20 mg/l	ASTM 512
8.	Kandungan belerang (S)	maks. 50 mg/l	ASTM D2622
9.	Kadar getah purwa	maks. 5 mg/100ml	ASTM D381

(Sumber : SNI 7390:2012)

Angka oktan (*octane number*) merupakan ukuran kemampuan suatu bahan bakar untuk menahan terjadinya pembakaran spontan (*autoignition*) atau *knocking* pada mesin penyalan-busi (*spark ignition engine*). Semakin tinggi angka oktan suatu bahan bakar, semakin besar kemampuannya untuk menahan detonasi dini sehingga proses pembakaran berlangsung lebih stabil dan efisien. Angka oktan umumnya dinyatakan dalam bentuk *Research Octane Number* (RON) dan *Motor Octane Number* (MON) yang ditentukan menggunakan mesin uji standar (*Cooperative Fuel Research Engine*) berdasarkan metode ASTM D2699 dan ASTM D2700 (Setyo Wibowo et al., 2018).

Tingginya angka oktan bioetanol juga menjadikannya sebagai bahan aditif yang efektif untuk meningkatkan kualitas bensin melalui pencampuran dalam berbagai komposisi, seperti E5, E10, E20, dan E85. Selain dipengaruhi oleh struktur kimia bahan bakar, angka oktan bioetanol juga dipengaruhi oleh tingkat kemurnian etanol dan kandungan air. Bioetanol dengan kadar etanol yang tinggi dan kadar air yang rendah umumnya memiliki karakteristik pembakaran yang lebih baik (Barua et al., 2023).

2.3 Penelitian Terdahulu

Adapun penelitian terdahulu yang dijadikan referensi dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 2.5** berikut.

Tabel 2.5 Referensi Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti	Judul	Bahan Baku	Perlakuan	Hasil Utama
1.	Manyuchi et al., 2018	<i>Bio ethanol from sewage sludge : A bio fuel alternative</i>	Lumpur limbah	<i>Bacillus flexus</i> dari Sigma Aldrich digunakan untuk sakarifikasi gula dari lumpur limbah untuk membuat hidrolisat. Ragi kemudian digunakan sebagai biokatalis fermentasi untuk konversi hidrolisat lumpur limbah menjadi bioetanol.	Hasil bioetanol tertinggi hingga 60 mL/L diperoleh pada periode inkubasi 10 hari, dengan suhu operasi 30°C dan pH 6,5 dengan ragi 6% berat sebagai katalis fermentasi yang ideal.
2.	Zahriani & Sutjahjo, 2013	Pemanfaatan Limbah Nasi Basi menjadi Bioetanol sebagai Bahan Bakar Alternatif	Limbah nasi basi	Pembuatan bioetanol melalui tahapan sakarifikasi, fermentasi, dan distilasi. Kemudian untuk mendapatkan kadar etanol yang tinggi dilakukan distilasi 6 kali dengan penambahan silica gel, batu kapur dan garam pada proses distilasi selanjutnya.	- Perbandingan terbaik adalah 250 gram nasi basi, 1000 ml air dan 9 gram ragi dengan waktu fermentasi 5 hari yang menghasilkan kadar bioetanol 28%. - Pembuatan dari limbah nasi skala besar mampu menghasilkan 330 ml bioetanol dengan kadar 96,5%.

No.	Peneliti	Judul	Bahan Baku	Perlakuan	Hasil Utama
3.	Sudibandriyo & Putri, 2020	<i>The Effect of Various Zeolites as an Adsorbent for Bioethanol Purification using a Fixed Bed Adsorption Column</i>	Singkong pahit (<i>Manihot glaziovii</i>)	Adsorpsi menggunakan zeolit 3A dan 4A	Hasil penelitian membuktikan bahwa adsorpsi dengan menggunakan zeolit 3A paling mendekati ukuran molekul air, sehingga lebih selektif terhadap air, yang menghasilkan kemurnian etanol yang lebih tinggi (62,41% v/v dan 33,27% v/v)
4.	Vinata et al., 2025	<i>Optimization of Ethanol Purification by Adsorption Process Using Silica Gel with Response Surface Methodology</i>	Molase	Proses adsorpsi dilakukan dengan menguapkan 300 ml etanol pada suhu sekitar 78°C. Uap etanol melewati kolom adsorpsi yang berisi gel silika di mana air dan pengotor yang ada dalam uap diadsorpsi oleh gel silika. Selanjutnya, uap etanol dikondensasikan menjadi bentuk cair dan dikumpulkan dalam labu Erlenmeyer untuk analisis.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa adsorpsi silica gel sangat efektif dalam meningkatkan kemurnian etanol, dengan konsentrasi tertinggi yang terukur sebesar 99,8% diperoleh menggunakan alkoholmeter pada laju aliran 0,1 ml/s dan 60 gram adsorben.

No.	Peneliti	Judul	Bahan Baku	Perlakuan	Hasil Utama
5.	Muhammad Khisbul Bakhor & Muhaji, 2022	Proses Pembuatan dan Uji Karakteristik Bioetanol dari Bonggol Pohon Pisang Raja (<i>Musa Paradisiaca</i>)	Bonggol pohon pisang raja (<i>Musa Paradisicala</i>)	Pembuatan bioetanol melalui tahapan sakarifikasi, fermentasi, dan distilasi. Kemudian distilasi dilakukan 5 kali namun saat distilasi ketiga menggunakan variasi berat adsorben 6, 7 dan 8 gram untuk mengetahui berat yang optimal.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa etanol optimal diperoleh pada adsorben 7 gram yaitu kadar awal 43% meningkat menjadi 87% dan pada distilasi kelima 99,66% sehingga memenuhi Standar Dirjen EBTKE Nomor. 722K/10/DJE/2013.