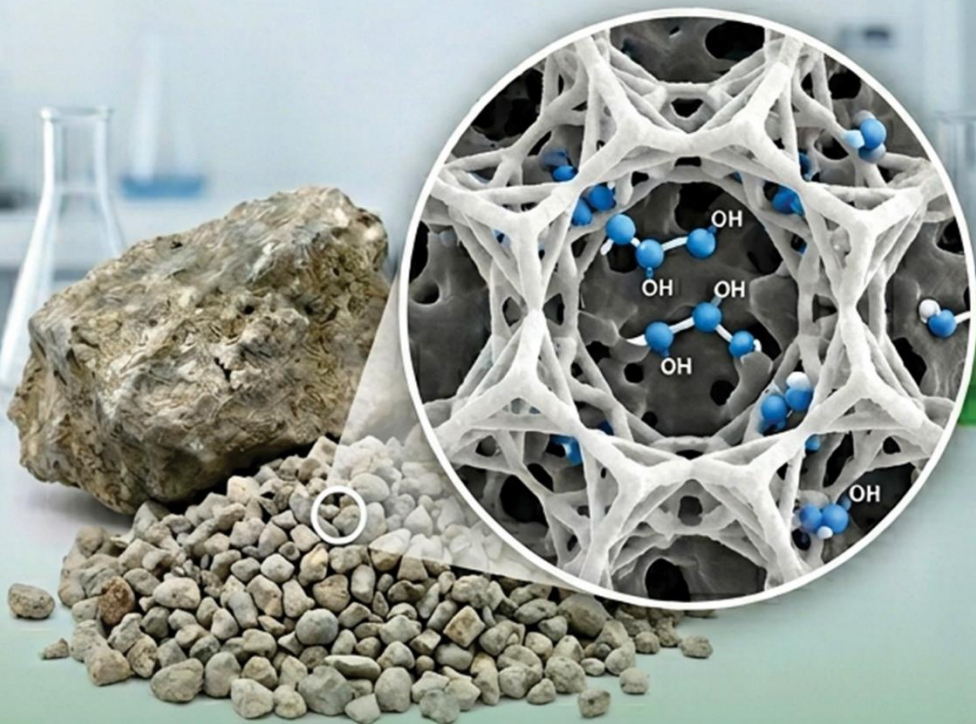


ZEOLIT ALAM TERMODIFIKASI

Molecular Sieve untuk Bioetanol



**KHAIDIR
DWI SETYANINGSIH**

Zeolit Alam

TERMODIFIKASI



Molecular Sieve Untuk Bioetanol



Khaidir
Dwi Setyaningsih



Penerbit KBM Indonesia

Adalah penerbit dengan misi memudahkan proses penerbitan buku-buku penulis di tanah air indonesia, serta menjadi media *sharing* proses penerbitan buku

ZEOLIT ALAM TERMODIFIKASI

Molecular Sieve Untuk Bioetanol

Copyright @2026 by Khaidir, dkk

All rights reserved

PENERBIT KARYA BAKTI MAKMUR (KBM) INDONESIA

Anggota IKAPI (Ikatan Penerbit Indonesia) **NO. IKAPI 279/JTI/2021**

Depok, Sleman-Jogjakarta (Kantor) **081357517526 (Tlpn/WA)**

Penulis

Khaidir

Dwi Setyaningsih

Desain Sampul

Eca Art

Tata Letak

Lailatul Nur Ula

Editor Naskah

Dr. Mulyadi, M.A.

ISBN

978-634-278-404-4

15,5 x 23 cm, iv + 140 halaman

Cetakan ke-1, Mei 2026

Isi buku diluar tanggungjawab penerbit

Hak cipta merek KBM Indonesia sudah terdaftar di

DJKI-Kemenkumham dan isi buku dilindungi undang-undang

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau

Memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini

Tanpa seizin penerbit karena beresiko sengketa hukum

Website

<https://penerbitkbm.com>

www.penerbitbukumurah.com

Instagram

@penerbit.kbmindonesia

@penerbitbukujogja

Email

naskah@penerbitkbm.com

Distributor

<https://penerbitkbm.com/toko-buku/>

Youtube

Penerbit KBM Sastrabook

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

- (i) Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
- (ii) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- (iii) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
- (iv) Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga buku berjudul **"ZEOLIT ALAM TERMODIFIKASI: *Molecular Sieve* Untuk Bioetanol"** ini dapat diselesaikan dengan baik.

Buku ini disusun di tengah momentum besar dunia yang sedang bertransformasi menuju penggunaan energi terbarukan yang lebih bersih dan berkelanjutan. Indonesia, dengan kekayaan sumber daya alamnya yang melimpah, memiliki potensi luar biasa untuk menjadi pemain kunci dalam industri energi hijau, khususnya melalui pengembangan bioetanol. Namun, efisiensi produksi masih menjadi tantangan besar, terutama pada tahap pemurnian tingkat lanjut.

Fokus utama buku ini adalah mengeksplorasi peran mineral zeolit alam sebagai saringan molekuler (*molecular sieve*). Penulis berupaya membedah bagaimana batuan mentah yang melimpah di jalur vulkanik nusantara dapat ditingkatkan nilai fungsionalnya melalui modifikasi kimia dan fisik. Dengan sentuhan teknologi, zeolit alam tidak lagi sekadar mineral tambang murah, melainkan instrumen presisi yang mampu memisahkan molekul air dari etanol pada skala angstrom.

Buku ini menyajikan pembahasan yang komprehensif, mulai dari pemahaman fundamental mengenai mekanisme adsorpsi, teknik aktivasi material, hingga metode karakterisasi canggih

menggunakan instrumen mutakhir. Harapan penulis, buku ini dapat menjadi referensi berharga bagi para akademisi, peneliti, mahasiswa, serta praktisi industri yang ingin mendalami teknologi pengolahan material dan pemurnian energi nabati.

Penulis menyadari bahwa selesainya buku ini tidak terlepas dari dukungan, bimbingan, dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, ucapan terima kasih yang tulus disampaikan kepada rekan-rekan sejawat, institusi terkait, dan keluarga yang telah memberikan motivasi tiada henti.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa buku ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi perbaikan di masa mendatang. Semoga karya ini dapat memberikan kontribusi nyata bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan kedaulatan energi di Indonesia.

Selamat membaca.

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI.....	iii
BAB 1	
BIOETANOL.....	1
Definisi dan Karakteristik Bioetanol.....	1
Klasifikasi Generasi Bioetanol.....	7
Prinsip Dasar Konversi Bioetanol	11
BAB 2	
DEHIDRASI	17
Definisi dan Prinsip Dasar Dehidrasi.....	17
Mekanisme Pemisahan Air dalam Campuran.....	24
Cara-Cara Dehidrasi pada Industri Kimia.....	29
Faktor yang Memengaruhi Efisiensi Dehidrasi	33
BAB 3	
<i>MOLECULAR SIEVE (PENYARING MOLEKULAR)</i>..	39
Konsep Dasar <i>Molecular Sieve</i>	39
Karakteristik Selektivitas Penyaring Molekular	41
Mekanisme Kerja Adsorpsi Fisik	45
Jenis-Jenis Material Penyaring Molekular.....	49
BAB 4	
<i>ZEOLIT MOLECULAR SIEVE (ZMS)</i>	55
Struktur Mikro dan Kristalinitas ZMS.....	62
Sifat Fisika dan Kimia Kerangka Zeolit	66
Kapasitas Adsorpsi Zeolit terhadap Molekul Air.....	70
Keunggulan ZMS sebagai Material Dehidrasi	73

BAB 5

KARAKTERISASI ZMS	79
Fluoresensi Sinar-X dan <i>Energy Dispersive X-Ray</i>	79
Difraksi Sinar-X	84
<i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	89
Analisis Distribusi Pori Zeolit	90

BAB 6

DEHIDRASI BIOETANOL MENGGUNAKAN ZEOLIT ALAM	97
Karakteristik dan Potensi Zeolit Alam	97
Proses Aktivasi dan Preparasi Zeolit Alam	101
Kinerja Zeolit Alam dalam Pemurnian Bioetanol	105
Kelebihan dan Kekurangan Zeolit Alam sebagai Adsorben	110

BAB 7

DEHIDRASI BIOETANOL MENGGUNAKAN ZEOLIT A SINTETIS	117
Karakteristik Zeolit A Sintetis	117
Mekanisme Pemurnian Bioetanol dengan Zeolit A Sintetis	122
Perbandingan Penggunaan Zeolit Alam dan Zeolit A Sintetis	126
DAFTAR PUSTAKA	131
PROFIL PENULIS	137

BAB 1

BIOETANOL

Definisi dan Karakteristik Bioetanol

Etanol merupakan senyawa kimia dengan rumus C_2H_5-OH . Strukturnya serupa dengan air, tetapi satu atom hidrogennya diganti satu gugus etil. Bioetanol merupakan etanol yang diproduksi dari bahan baku tanaman yang mengandung gula dan pati. Ubi kayu, ubi jalar, dan jagung merupakan sumber pati yang biasa ditanam rakyat hampir di seluruh wilayah Indonesia, sehingga jenis tanaman tersebut merupakan tanaman yang potensial untuk dipertimbangkan sebagai sumber bahan baku pembuatan bioetanol. Namun dari semua jenis tanaman tersebut, ubi kayu merupakan tanaman yang setiap hektarnya sangat tinggi dalam memproduksi pati sebagai bahan baku untuk pembuatan bioetanol. Selain itu, pertimbangan pemakaian ubi kayu sebagai bahan baku proses produksi bioetanol juga didasarkan pada pertimbangan ekonomi. Pertimbangan keekonomian pengadaan bahan baku tersebut bukan saja meliputi harga produksi tanaman sebagai bahan baku, tetapi juga meliputi biaya pengelolaan tanaman, biaya produksi pengadaan bahan baku, dan biaya bahan baku untuk memproduksi setiap liter bioetanol.

Etanol diakui sebagai salah satu senyawa kimia yang paling serbaguna dalam dunia industri dan energi dengan identitas

molekul yang spesifik, yakni sering direpresentasikan melalui rumus kimia. Jika ditinjau dari sisi struktural, molekul etanol memiliki kemiripan yang cukup signifikan dengan struktur molekul air di mana perbedaan mendasarnya terletak pada penggantian satu atom hidrogen pada molekul air dengan satu gugus etil yang kemudian membentuk karakteristik unik senyawa tersebut. Transisi dari etanol kimia murni menuju konsep bioetanol ditentukan oleh sumber produksinya, yang mana bioetanol didefinisikan sebagai etanol yang dihasilkan melalui proses biologis, khususnya melalui pengolahan bahan nabati yang melimpah di alam seperti tanaman yang mengandung gula dan pati karena kemudahannya untuk dikonversi menjadi glukosa. Indonesia memiliki kekayaan hayati yang sangat mendukung pengembangan industri ini melalui berbagai jenis tanaman sumber pati yang tumbuh subur di tanah air, seperti ubi kayu, ubi jalar, dan jagung yang telah lama menjadi bagian dari sistem pertanian rakyat yang tersebar hampir di seluruh pelosok wilayah.

Meskipun ketiga jenis tanaman tersebut sangat potensial untuk dipertimbangkan sebagai pilar utama dalam pemenuhan kebutuhan bahan baku pembuatan bioetanol di dalam negeri, ubi kayu atau singkong sering kali muncul sebagai pilihan terbaik karena memiliki keunggulan komparatif yang sulit ditandingi oleh tanaman pati lainnya. Dari sisi efisiensi lahan, ubi kayu menunjukkan performa yang sangat luar biasa dengan angka produktivitas pati yang sangat tinggi untuk setiap hektar lahan, sehingga volume pati yang dihasilkan menjadikannya bahan mentah yang sangat ideal dalam memproduksi jumlah liter bioetanol yang maksimal dari setiap siklus panen. Keputusan penggunaan ubi kayu juga didasarkan pada analisis ekonomi yang mendalam, di mana efisiensi biaya menjadi kunci utama melalui

pertimbangan harga produksi tanaman di tingkat petani yang kompetitif, biaya pengelolaan lahan yang efisien, hingga biaya logistik dalam pengadaan bahan baku. Pada akhirnya, seluruh variabel biaya tersebut dikonsolidasikan untuk menentukan biaya produksi setiap liter bioetanol, dan dalam perhitungan ini, ubi kayu terbukti memberikan rasio biaya yang paling ekonomis untuk mendukung keberlanjutan industri energi terbarukan secara nasional.

Secara umum bioetanol dapat digunakan sebagai bahan baku industri turunan alkohol, campuran untuk miras, bahan dasar industri farmasi, dan campuran bahan bakar kendaraan. Mengingat pemanfaatan bioetanol beraneka ragam, maka terdapat penggolongan kualitas (*grade*) bioetanol. Bioetanol yang mempunyai kadar 90-96,5% volume dapat digunakan pada industri, sedangkan bioetanol yang mempunyai kadar 96-99,5% volume dapat digunakan sebagai campuran untuk miras dan bahan dasar industri farmasi. Bioetanol yang dimanfaatkan sebagai campuran bahan bakar untuk kendaraan harus betul-betul kering dan *anhydrous* supaya tidak korosif, sehingga bioetanol harus mempunyai kadar sebesar 99,5-100% volume.

Etanol memiliki peran yang sangat strategis dalam industri bahan bakar modern, terutama karena karakteristik kimianya yang menguntungkan dibandingkan dengan bensin atau gasolin konvensional. Salah satu keunggulan teknis yang paling menonjol adalah angka oktannya yang jauh lebih tinggi, sebuah parameter yang menentukan ketahanan bahan bakar terhadap ketukan atau *knocking* di dalam mesin.

Dalam aplikasinya di lapangan, keunggulan angka oktan pada etanol ini memberikan fleksibilitas bagi produsen bahan bakar

untuk menciptakan campuran yang lebih efisien. Ketika etanol dicampur dengan bensin dalam proporsi tertentu, keberadaannya secara otomatis mendorong peningkatan bilangan oktan pada keseluruhan volume campuran bahan bakar tersebut.

Peningkatan angka oktan melalui campuran etanol ini membawa dampak positif pada pengurangan ketergantungan terhadap bahan aditif kimia yang berbahaya. Secara tradisional, industri bensin seringkali memerlukan zat tambahan untuk meningkatkan oktan agar mesin kendaraan dapat beroperasi dengan stabil tanpa merusak komponen internal.

Salah satu zat aditif yang kebutuhannya dapat ditekan secara signifikan berkat penggunaan etanol adalah benzena. Pengurangan benzena dalam campuran bahan bakar sangat krusial karena zat ini dikenal memiliki sifat toksik atau beracun yang dapat membahayakan kesehatan manusia jika terpapar dalam jangka panjang.

Lebih jauh lagi, peran etanol tidak hanya berhenti pada peningkatan performa mesin melalui angka oktan, tetapi juga berfungsi sebagai agen penyedia oksigen atau *oxygenate*. Kandungan oksigen yang terikat secara alami di dalam struktur molekul etanol menjadi pembeda utama antara bahan bakar nabati ini dengan bahan bakar fosil murni.

Kehadiran oksigen tambahan dari etanol di dalam ruang bakar memastikan terjadinya proses oksidasi yang jauh lebih merata selama mesin bekerja. Dengan ketersediaan oksigen yang cukup, proses pembakaran bahan bakar di dalam piston menjadi lebih sempurna dan efisien dibandingkan jika hanya menggunakan bensin biasa.

Hasil dari pembakaran yang lebih sempurna ini secara langsung berkontribusi pada penurunan kadar emisi gas buang yang berbahaya bagi lingkungan. Salah satu jenis polutan utama yang volumenya dapat ditekan secara drastis melalui penggunaan campuran etanol adalah karbon monoksida atau CO.

Selain menekan emisi CO, pembakaran yang dioptimalkan oleh etanol juga mengurangi jumlah hidrokarbon yang tidak terbakar. Hidrokarbon yang terlepas ke atmosfer akibat pembakaran yang tidak tuntas merupakan salah satu penyebab utama terbentuknya kabut asap dan masalah kesehatan pernapasan.

Penurunan berbagai gas buang berbahaya tersebut menjadikan bioetanol sebagai solusi nyata untuk mengurangi tingkat pencemaran udara di area perkotaan yang padat kendaraan. Dengan emisi yang lebih bersih, kualitas udara yang kita hirup setiap hari dapat terjaga dengan lebih baik bagi keberlangsungan hidup masyarakat.

Secara keseluruhan, pemanfaatan etanol sebagai campuran bahan bakar menawarkan manfaat ganda yang sangat berharga bagi sektor transportasi dan lingkungan. Mulai dari peningkatan kinerja teknis mesin hingga perlindungan ekosistem melalui pengurangan emisi beracun, etanol membuktikan dirinya sebagai komponen kunci dalam transisi energi masa depan.

Etanol memiliki angka oktan lebih tinggi daripada bensin (gasolin), yang dapat mendorong peningkatan bilangan oktan pada saat dicampur, sehingga dapat mengurangi kebutuhan akan bahan aditif beracun seperti benzena. Lebih jauh lagi, etanol menyediakan oksigen, sehingga pembakaran lebih sempurna dan dapat mengurangi emisi CO dan hidrokarbon yang tidak terbakar, yang dapat mencemari udara. Karakteristik fisika dan kimia utama

dari bioetanol dibandingkan terhadap bahan bakar diesel dan gasolin disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1 Perbandingan karakteristik fisika dan kimia bioetanol, diesel, dan gasolin

	Diesel	Etanol	Gasolin
<i>Low heating value</i> -LHV (MJ/kg)	42,7	26,9	43,7
<i>Low heating value</i> -LHV (MJ/l)	36,4	21,0	32,0
Viskositas (cSt)	2,5	-	-
Densitas (kg/m ³) @ 15°C	830 – 880	790	700 – 780
Bilangan oktan (MON)	-	96 – 106	79 – 98
Tekanan uap @ 38°C (psi)	0,04	2,5	7 – 9
<i>Flash point</i> (°C)	55 – 65	13	(-40)
Temperatur didih (°C)	17 – 340	78	33 – 213
Panas penguapan (kJ/kg)	-	842	300
Suhu <i>Auto-ignition</i> (°C)	230 – 315	366	300 – 371
<i>Flammability limits</i> (°C)	64 – 150	13 – 42	(-40) – (-18)
<i>Flammability limits</i> (% vol)	0,6 – 5,6	3,3 – 19,0	1,4 – 7,6

Sumber: Chiaramonti (2007)

Etanol dapat direaksikan dengan isobutilen untuk membentuk “*ethyl tertiary butyl ether*” (ETBE) yang memberikan sifat-sifat yang menguntungkan dibanding penambahan langsung etanol karena menghasilkan tekanan uap campuran yang lebih rendah. Di samping itu, ETBE lebih mudah diintegrasikan ke dalam sistem distribusi gasolin karena memiliki sifat yang sangat mirip dengan gasolin. Beberapa keuntungan dari penggunaan bioetanol sebagai bahan bakar antara lain, (1) Mengurangi pengikisan lapisan ozon melalui penurunan emisi oksida karbon di udara, (2) Sepenuhnya dapat diperbaharui, (3) Menekan laju peningkatan CO₂ di udara melalui fotosintesis oleh tumbuhan; sementara jika menggunakan bahan bakar fosil akan terjadi penambahan jumlah karbon di

udara akibat pengeluaran sumber karbon yang selama ini ada di dalam perut bumi

Klasifikasi Generasi Bioetanol

Klasifikasi bioetanol berdasarkan generasi bahan bakunya merupakan aspek krusial untuk memahami perkembangan teknologi energi terbarukan. Pembagian ini didasarkan pada jenis biomassa yang digunakan serta kompleksitas proses konversinya.

Bioetanol generasi pertama (1G) merupakan jenis yang paling umum diproduksi secara komersial saat ini karena menggunakan bahan baku yang kaya akan gula atau pati. Tanaman seperti tebu, jagung, singkong, dan gandum menjadi sumber utama karena proses pengolahannya yang relatif sederhana, di mana pati atau gula langsung difermentasi menjadi etanol.

Namun, generasi pertama ini sering memicu perdebatan etis mengenai ketahanan pangan versus ketahanan energi. Karena bahan baku yang digunakan adalah komoditas pangan utama manusia, penggunaan skala besar dikhawatirkan dapat memicu kenaikan harga pangan dan perebutan lahan pertanian yang produktif.

Untuk mengatasi kendala tersebut, dikembangkanlah bioetanol generasi kedua (2G) yang memanfaatkan biomassa lignoselulosa. Bahan baku ini berasal dari limbah pertanian dan kehutanan yang tidak dikonsumsi manusia, seperti jerami padi, bagasse tebu (ampas tebu), tongkol jagung, hingga serbuk gergaji.

Proses produksi generasi kedua jauh lebih kompleks karena memerlukan tahap *pre-treatment* untuk memecah struktur lignin yang keras agar selulosa dapat diakses. Setelah itu, selulosa harus

dipecah menjadi gula melalui proses hidrolisis sebelum akhirnya bisa difermentasi menjadi bioetanol.

Selanjutnya, muncul bioetanol generasi ketiga (3G) yang menggunakan mikroorganisme air seperti alga dan mikroalga sebagai bahan baku utama. Alga memiliki keunggulan luar biasa karena mampu tumbuh sangat cepat, memiliki kandungan karbohidrat tinggi, dan tidak memerlukan lahan pertanian subur untuk budidayanya.

Keunggulan lain dari generasi ketiga adalah kemampuannya dalam menyerap karbon dioksida dari atmosfer secara masif selama masa pertumbuhan alga. Hal ini menjadikan bioetanol 3G sebagai teknologi yang sangat ramah lingkungan karena memiliki jejak karbon yang sangat rendah atau bahkan negatif.

Terakhir, para peneliti kini mulai mengembangkan bioetanol generasi keempat (4G) yang melibatkan rekayasa genetika. Pada tahap ini, mikroorganisme pengolah atau tanaman bahan baku dimodifikasi secara genetik untuk meningkatkan efisiensi penyerapan karbon dan memaksimalkan hasil produksi bahan bakar.

Generasi keempat bertujuan untuk menciptakan sistem "pabrik biologis" yang mampu mengubah energi matahari dan secara langsung menjadi bahan bakar siap pakai. Meskipun masih dalam tahap riset intensif, teknologi ini diprediksi akan menjadi masa depan energi bersih yang paling berkelanjutan.

Secara keseluruhan, transisi dari generasi pertama menuju generasi berikutnya menunjukkan upaya global untuk menemukan keseimbangan antara kebutuhan energi dan pelestarian sumber daya pangan serta lingkungan. Setiap tingkatan

generasi membawa kita lebih dekat pada solusi energi yang benar-benar mandiri dan tidak merusak ekosistem.

Proses hidrolisis pada **Generasi Kedua (2G)** adalah tahapan yang paling krusial sekaligus menantang dalam produksi bioetanol. Hal ini dikarenakan struktur bahan baku lignoselulosa (seperti limbah pertanian) jauh lebih kokoh dibandingkan bahan baku berpati pada generasi pertama.

Berikut adalah proses teknis hidrolisis:

1. Tantangan Struktur Lignoselulosa

Sebelum masuk ke tahap hidrolisis, kita harus memahami bahwa limbah pertanian terdiri dari tiga komponen utama: **selulosa, hemiselulosa, dan lignin**. Lignin berfungsi sebagai "perekat" alami yang membungkus selulosa dengan sangat kuat. Tanpa proses pemecahan awal (*pre-treatment*), enzim atau asam tidak akan bisa menyentuh serat selulosa untuk mengubahnya menjadi gula.

2. Tahapan Hidrolisis Asam (Acid Hydrolysis)

Metode ini merupakan teknik tertua yang digunakan dalam industri. Bahan baku dipaparkan pada asam kuat (seperti H_2SO_4) pada suhu dan tekanan tertentu.

- **Keunggulan:** Proses berlangsung sangat cepat dan mampu menembus struktur lignin dengan efektif.
- **Kelemahan:** Asam bersifat korosif terhadap mesin pabrik dan seringkali menghasilkan senyawa sampingan (*inhibitor*) yang dapat meracuni ragi pada tahap fermentasi selanjutnya.

3. Tahapan Hidrolisis Enzimatis (Enzymatic Hydrolysis)

Ini adalah metode yang dianggap paling modern dan ramah lingkungan. Proses ini menggunakan biokatalis berupa enzim

(biasanya enzim *selulase*) untuk memutus ikatan glikosidik pada selulosa.

- **Mekanisme Kerja:** Enzim bekerja layaknya "gunting molekuler" yang memotong rantai panjang polimer selulosa menjadi monomer gula sederhana (glukosa).
- **Kondisi Operasi:** Berbeda dengan asam, enzim bekerja pada suhu yang lebih rendah (sekitar **45°C - 50°C**) dan pH yang hampir netral, sehingga lebih hemat energi dan tidak merusak peralatan.

4. Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi

Keberhasilan hidrolisis sangat bergantung pada beberapa variabel teknis:

- **Ukuran Partikel:** Semakin halus bahan baku, semakin luas permukaan yang bisa bereaksi dengan enzim.
- **Konsentrasi Enzim:** Penentuan dosis enzim yang tepat sangat penting untuk menyeimbangkan antara kecepatan produksi dan biaya operasional.
- **Lama Waktu Reaksi:** Hidrolisis enzimatis biasanya memakan waktu lebih lama (bisa mencapai 48–72 jam) dibandingkan hidrolisis asam.

5. Menuju Tahap Fermentasi

Setelah proses hidrolisis selesai, hasilnya adalah cairan kaya gula yang disebut *hydrolysate*. Cairan inilah yang kemudian akan masuk ke tahap fermentasi untuk diubah oleh mikroorganisme menjadi bioetanol. Dalam naskah buku, bagian ini penting untuk menekankan bahwa efisiensi di tahap hidrolisis akan menentukan seberapa besar rendemen (*yield*) etanol yang akan didapatkan pada akhirnya.

Prinsip Dasar Konversi Bioetanol

Prinsip dasar konversi bioetanol merupakan sebuah proses transformasi biokimia yang sistematis untuk mengubah energi matahari yang tersimpan dalam bentuk ikatan kimia tanaman menjadi bahan bakar cair yang praktis. Secara garis besar, proses ini melibatkan perubahan struktur karbohidrat kompleks, baik dalam bentuk pati, gula sederhana, maupun lignoselulosa, menjadi senyawa etanol melalui bantuan aktivitas mikroorganisme dalam lingkungan yang terkendali.

Tahapan awal dalam prinsip konversi ini adalah pembersihan dan pengecilan ukuran bahan baku, yang bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan kontak antara bahan dengan zat reaktan pada tahap berikutnya. Untuk tanaman seperti ubi kayu atau jagung, proses penggilingan menjadi tepung sangat krusial karena butiran pati yang terperangkap di dalam sel tanaman harus dibebaskan agar proses hidrolisis dapat berjalan dengan efisiensi yang maksimal tanpa adanya hambatan fisik yang berarti.

Setelah bahan baku siap, prinsip selanjutnya adalah sakarifikasi atau hidrolisis, yang berfungsi sebagai jembatan untuk memutus rantai polimer karbohidrat yang panjang menjadi monomer gula sederhana seperti glukosa. Dalam konteks ubi kayu, pati harus dimasak terlebih dahulu melalui proses gelatinisasi agar strukturnya melunak, sebelum kemudian ditambahkan enzim alfa-amilase dan gluko-amilase yang akan bekerja memutus ikatan kimia karbohidrat secara spesifik pada kondisi suhu tertentu.

Pada bahan baku generasi kedua yang berbasis limbah pertanian, prinsip hidrolisis menjadi jauh lebih kompleks karena adanya penghalang alami berupa lignin yang membungkus selulosa. Oleh

karena itu, prinsip *pre-treatment* secara kimiawi atau termal harus dilakukan terlebih dahulu untuk melonggarkan ikatan lignoselulosa tersebut, sehingga enzim selulase dapat mengakses serat selulosa untuk dikonversi menjadi gula pereduksi yang siap difermentasi.

Prinsip ketiga yang sangat vital adalah fermentasi, di mana terjadi konversi biologis dari gula sederhana menjadi etanol dan karbon dioksida melalui jalur metabolisme mikroorganisme. Dalam tahap ini, lingkungan fermentor harus dijaga dengan sangat ketat, terutama pada parameter pH dan suhu, agar mikroorganisme seperti ragi *Saccharomyces cerevisiae* dapat bekerja secara optimal dalam mengubah setiap molekul glukosa menjadi dua molekul etanol.

Kondisi anaerob atau ketiadaan oksigen menjadi prinsip mutlak dalam proses fermentasi bioetanol agar mikroorganisme tidak melakukan respirasi seluler yang justru akan menghasilkan air dan karbon dioksida saja. Dengan membatasi pasokan oksigen, ragi akan dipaksa melakukan fermentasi alkohol sebagai jalur untuk menghasilkan energi bagi kelangsungan hidupnya, yang secara tidak langsung memberikan keuntungan bagi manusia berupa produk sampingan berupa alkohol.

Selama proses fermentasi berlangsung, konsentrasi etanol di dalam cairan fermentasi akan terus meningkat hingga mencapai titik di mana ragi mulai mengalami inhibisi atau hambatan pertumbuhan akibat racun dari produknya sendiri. Prinsip pemilihan galur mikroorganisme yang toleran terhadap kadar alkohol tinggi menjadi kunci keberhasilan industri bioetanol agar proses konversi gula dapat berjalan tuntas hingga tidak ada lagi gula sisa yang terbuang percuma di dalam tangki.

Hasil dari fermentasi biasanya disebut dengan istilah *mash* atau cairan *beer*, yang masih mengandung campuran antara air, sisa-sisa biomassa, ragi, dan kadar etanol yang berkisar antara 7% hingga 12% saja. Prinsip dasar konversi selanjutnya beralih dari proses biokimia ke proses pemisahan fisik melalui metode distilasi, yang memanfaatkan perbedaan titik didih antara komponen-komponen yang ada di dalam campuran tersebut untuk mendapatkan kemurnian yang lebih tinggi.

Dalam proses distilasi, cairan dipanaskan secara bertahap hingga mencapai suhu di atas titik didih etanol ($78,3^{\circ}\text{C}$) namun tetap berada di bawah titik didih air (100°C), sehingga uap etanol akan naik menuju kolom fraksinasi. Prinsip pengulangan penguapan dan pengembunan di dalam kolom distilasi memastikan bahwa uap yang mencapai bagian atas kolom memiliki konsentrasi etanol yang semakin pekat, sementara air dan komponen berat lainnya akan turun kembali ke dasar tangki.

Namun, distilasi konvensional memiliki keterbatasan fisik yang dikenal sebagai titik azeotrop, di mana campuran etanol dan air pada kadar 95,6% tidak dapat lagi dipisahkan hanya dengan pemanasan biasa. Prinsip ini menjelaskan mengapa hasil distilasi maksimal biasanya hanya mencapai kadar 96%, yang secara teknis sudah cukup untuk kebutuhan medis atau industri kimia ringan, namun belum memenuhi standar bahan bakar kendaraan bermotor.

Agar bioetanol dapat dicampur dengan bensin tanpa menyebabkan pemisahan fase atau kerusakan pada mesin kendaraan, prinsip dehidrasi atau penghilangan sisa air harus diterapkan untuk mencapai kadar minimal 99,5%. Proses dehidrasi modern umumnya menggunakan prinsip *Molecular Sieve*

atau saringan molekuler berbasis zeolit, yang bekerja dengan cara menangkap molekul air yang berukuran lebih kecil ke dalam pori-porinya, sementara molekul etanol yang lebih besar dibiarkan lewat.

Penggunaan teknologi *Molecular Sieve* ini jauh lebih efisien dibandingkan metode distilasi azeotropik lama yang menggunakan zat tambahan seperti benzena atau sikloheksana yang bersifat toksik dan berbahaya bagi lingkungan. Dengan prinsip penyerapan fisik ini, produsen dapat menghasilkan *Fuel Grade Ethanol* (FGE) yang benar-benar murni dan kering, sehingga aman untuk didistribusikan sebagai bahan bakar nabati yang berkelanjutan.

Selain proses utama di atas, prinsip pemanfaatan produk sampingan juga menjadi bagian tak terpisahkan dari ekosistem konversi bioetanol modern untuk meningkatkan nilai ekonomis pabrik. Misalnya, limbah padat sisa distilasi yang kaya akan protein dapat diproses menjadi pakan ternak berkualitas tinggi, sementara gas karbon dioksida yang tertangkap selama fermentasi dapat dimurnikan untuk kebutuhan industri minuman berkarbonasi atau pemadam api.

Integrasi seluruh prinsip konversi ini, mulai dari persiapan bahan baku hingga pemurnian akhir, memerlukan sistem manajemen energi yang ketat agar energi yang dihasilkan oleh bioetanol jauh lebih besar daripada energi yang dikeluarkan selama proses produksinya. Hal ini berkaitan dengan prinsip *Net Energy Balance*, di mana penggunaan biomassa sebagai sumber energi panas untuk proses distilasi dapat membantu menekan jejak karbon dari seluruh siklus hidup bahan bakar tersebut.

Secara keseluruhan, pemahaman terhadap setiap prinsip dasar konversi bioetanol memungkinkan para ilmuwan dan praktisi industri untuk terus melakukan inovasi, baik dalam hal efisiensi enzim maupun teknologi pemisahan. Dengan penerapan prinsip-prinsip ini secara tepat, bioetanol bukan hanya menjadi sekadar alternatif energi, tetapi juga menjadi solusi nyata dalam mewujudkan kemandirian energi nasional yang berbasis pada potensi sumber daya alam lokal di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Asheh S, Banat F, Al-Lagtah N. 2004. *Separation of Ethanol-Water Mixtures Using Molecular Sieves and Biobased Adsorbents*. *Chem Eng Res Des* 82: 855-864.
- [Anonim]. 1864. *Mordenite Mineral Data*. <http://webmineral.com/data/Mordenite.shtml>. [11 Juli 2011].
- [Anonim]. 1923. *Clinoptilolite-K Mineral Data*. <http://webmineral.com/data/Clinoptilolite-K.shtml>. [11 Juli 2011].
- [Anonim]. 1969. *Clinoptilolite-Na Mineral Data*. <http://webmineral.com/data/Clinoptilolite-Na.shtml>. [11 Juli 2011].
- [Anonim]. 2002. *Ethanol: Useful information and resources*. http://www.ethanolindia.net/molecular_sieves.html. [30 Maret 2009].
- [Anonim]. 2006. *Molecular Sieve*. <http://www.molecularsieve.org>. [30 Maret 2009].
- Atkins PW. 1999. *Kimia Fisika*. Ed ke-4. Kartohadiprodjo II, penerjemah; Indarto PW, editor. Jakarta: Erlangga. Terjemahan dari: *Physical Chemistry*.
- Austin GT. 1984. *Shreve's Chemical Process Industries*. Ed ke-5. New York: McGraw-Hill.
- Bedard RL. 2010. Synthesis of Zeolites and Manufacture of Zeolitic Catalysts and Adsorbents. Di dalam: Kulprathipanja S, editor. *Zeolites in Industrial Separation and Catalysis*. Weinheim: J Wiley. hlm 61-84.
- Broach RW. 2010. Zeolite Types and Structures. Di dalam: Kulprathipanja S, editor. *Zeolites in Industrial Separation and Catalysis*. Weinheim: J Wiley. hlm 27-60.
- Brundle CR, Evans CA, Wilson S, editor. 1992. *Encyclopedia of Materials Characterization*. USA: Butterworth-Heinemann.

- Byrappa K, Yoshimura M. 2001. *Handbook of Hydrothermal Technology: A technology for crystal growth and materials processing*. New York: William Andrew.
- Carmo MJ, Gubulin JC. 1997. *Ethanol-Water Adsorption on Commercial 3A Zeolite: kinetic and thermodynamic data*. *Braz J Chem Eng* 14(3). [terhubung berkala]. [28 Maret 2009].
- Chiaramonti D. 2007. Bioethanol: role and production technologies. Di dalam: Ranalli P, editor. *Improvement of Crop Plants for Industrial End Uses*. Netherlands: Springer. hlm 209-251.
- Clark J. 2005. *Non-ideal Mixtures of Liquids*. <http://www.chemguide.co.uk/physical/phaseseqia/nonideal.html>. [25 Juli 2011].
- Clark J. 2007. *Pembuatan Alkohol dalam Skala Produksi*. <http://www.chem-is-try.org>. [07 Juli 2011].
- Condon JB. 2006. *Surface Area and Porosity Determinations by Physisorption: measurements and theory*. Amsterdam: Elsevier.
- Cotton FA, Wilkinson G. 1989. *Kimia Anorganik Dasar*. Suharto S, penerjemah. Jakarta: UI-Pr. Terjemahan dari: *Basic Inorganic Chemistry*.
- [Depdiknas] Departemen Pendidikan Nasional. 2005. *Kamus Besar Bahasa Indonesia*. Ed ke-3. Jakarta: Balai Pustaka.
- Díaz JC, Gil-Chávez ID, Giraldo L, Moreno-Piraján JC. 2010. *Separation of Ethanol-Water Mixture Using Type-A Zeolite Molecular Sieve*. *E J Chem* 7: 483-495.
- Earle RL, Earle MD. 1983. *Unit Operation in Food Processing*. The Web Ed. Published by NZIFST. <http://www.nzifst.org.nz/unitoperations/>.
- [EM] Era Media. 2008. *Kamus Pintar Kimia*. Bandung: Era Media.
- Flanigen EM. 1980. *Molecular Sieve Zeolite Technology-The First Twenty-Five Years*. Plenary Paper-Technology. *Pure Appl Chem* 52: 2191-2211. Great Britain: Pergamon Pr.
- Flanigen EM. 1991. *Zeolite and Molecular Sieves an Historical Perspective*. New York: Elsevier Science.
- Gubta RB, Demirbas A. 2010. *Gasolin, Diesel, and Ethanol Biofuels from Grasses and Plants*. Cambridge: Cambridge Univ Pr.

- Hart H. 2004. *Kimia Organik: Suatu kuliah singkat*. Ed ke-6. Achmadi SS, penerjemah. Jakarta: Erlangga. Terjemahan dari *Organic Chemistry: A short course*.
- He BB. 2009. *Two-Dimensional X-Ray Diffraction*. New Jersey: J Wiley.
- Igbokwe PK, Okolomike RO, Nwokolo SO. 2008. *Zeolite for Drying of Ethanol-Water and Methanol-Water Systems from Nigerian Clay Resource*. *J Univ Chem Technol Met* 43: 109-112.
- [IUPAC] International of Pure and Applied Chemistry. 1985. *Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to The Determination of Surface Area and Porosity*. *Pure Appl. Chem.* 57: 603-619. www.iupac.org/publications/pac/57/4/0603/pdf/. [22 September 2009].
- [IUPAC] International of Pure and Applied Chemistry. 1997. *IUPAC Compendium of Chemical Terminology*. Ed ke-2. <http://www.iupac.org/goldbook.pdf>. [15 Juni 2009].
- Ivanova E, Damgaliev D, Kostova M. 2009. *Adsorption Separation of Ethanol-Water Liquid Mixtures by Natural Clinoptilolite*. *J Univ Chem Technol Met* 44: 267-274.
- Kohl S. 2004. *Ethanol 101-7: Dehidration*. Ethanol Today. Maret 2004. http://www.ovsclub.com.vn/datapic/File/Ethanol_Dehydration.pdf. [13 Februari 2009].
- Kurniawan Y, Susmiadi A, Toharisman A. 2005. *Potensi Pengembangan Industri Gula Sebagai Penghasil Energi di Indonesia*. <http://p3gi.net/images/opini/Bioenergi.pdf>.
- Kuznicki SM, Langner TW, Curran JS, Bell VA, penemu; Engelhard Corporation. 2 Jul 2002. Method of forming high aluminum aluminosilicate zeolites. US Patent 6 413 492 B1.
- Leonard JJ, penemu; Atlantic Richfield Company. 27 Jan 1981. Preparation of zeolite A by hydrothermal treatment of clinoptilolite. US Patent 4 247 524.
- Ling LK, Ghazali M, Sadikin AN. 2008. *Pervaporation of Ethanol-Water Mixture Using PVA Zeolite-Clay Membranes*. *J Technol* 49: 167-177.

- Mortimer M, Taylor P. 2002. *Chemical kinetics and mechanism*. Cambridge: RSC.
- Mumpton FA. 1999. *La roca magica: Uses of natural zeolite in agriculture and industry*. *Proc Natl Acad Sci* 96: 3463-3470.
- Narayana M, Murray BD, penemu; Shell Oil Company. 2 Jun 1992. Process for realuminating zeolites. US Patent 5 118 484.
- Nimmo JR. 2004. Porosity and Pore Size Distribution. Di dalam: Hillel D, editor. *Encyclopedia of Soils in The Environment*. New York: Academic Pr. hlm 295-303.
- Nurdyastuti I. 2005. *Teknologi Proses Produksi Bio-Ethanol*. Prospek pengembangan biofuel sebagai substitusi bahan bakar minyak. www.geocities.com/markal_bppt/publish/biofb/bm/biindy.pdf. [13 Agustus 2008].
- Onuki S. 2006. *Bioethanol: Industrial production process and recent studies*. www.public.iastate.edu/~tge/courses/ce521/sonuki.pdf. [13 Februari 2009].
- Oudejans JC. 1984. *Zeolite Catalyst in Some Organic Reaction*. *Chem. Res.* Holland.
- Ozin GA, Arsenault AC. 2005. *Nanochemistry: A chemical approach to nanomaterials*. Cambridge: RSC.
- Pfenninger A. 1999. Manufacture and use of zeolites for adsorption processes. Di dalam: Karge HG, Weitkamp J, editor. *Molecular Sieve - Science and Technology*. Volume ke-2, *Structures and Structure Determination*. Berlin Heidelberg: Springer. hlm 163-198.
- Plee D, penemu; Ceca Company. 21 Jul 1992. Zeolite granules with zeolitic binder. US Patent 5 132 260.
- Polat E, Karaca M, Demir H, Onus AN. 2004. *Use of Natural Zeolite (Clinoptilolite) in Agriculture*. *J Fruit Ornmtl Plant Res* 12: Ed khusus.
- Pruksathorn P, Vitidsant T. 2009. *Production of Pure Ethanol from Azeotropic Solution by Pressure Swing Adsorption*. *Am J Eng Appl Sci* 2: 1-7.

- Purawiardi R. 1999. *Karakteristik Zeolit Alam Asal Bayah, Sukabumi Jawa Barat. Bul IPT* 5: 6-12.
- [QICD] Quantachrome Instruments Corporate Drive. 2004. *An Introduction to Calculation Methods for Surface Area and Pore Size From Gas Sorption Data*. Boynton Beach, Florida 33426 USA. [28 Mei 2011].
- Rakhmatullah DKA, Wiradini G, Ariyanto NP. 2007. *Pembuatan Adsorben dari Zeolit Alam dengan Karakteristik Adsorben Properties untuk Kemurnian Bioetanol*. <http://pub.bhaktiganesha.or.id>. [12 Agustus 2008].
- Richardson JT. 1989. *Principles of Catalyst Development*. USA: Kluwer Academic.
- Robson H, Lillerud KP, editor. 2001. *Verified Synthesis of Zeolitic Materials*. Ed rev ke-2. Amsterdam: Elsevier.
- Rouquerol F, Rouquerol J, Sing K. 1999. *Adsorption by Powders and Porous Solids*. London: Academic Pr.
- Saragih SA. 2008. *Pembuatan dan Karakterisasi Karbon Aktif dari Batubara Riau Sebagai Adsorben*. [tesis]. Jakarta: Program Pascasarjana, Universitas Indonesia.
- Sastiono A. 1993. *Perilaku Mineral Zeolit dan Pengaruhnya Terhadap Perkembangan Tanah* [disertasi]. Bogor: Program Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Sastrosupadi A. 1995. *Rancangan Percobaan Praktis untuk Bidang Pertanian*. Yogyakarta: Kanisius.
- Suhala S, Arifin M. 1997. *Bahan Galian Industri*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral. hlm 320-338.
- Sun HN, penemu; Atlantic Richfield Company. 30 Aug 1983. Two step process for preparation of zeolite A by hydrothermal treatment of clinoptilolite. US Patent 4 401 634.
- Suwardi. 2000. Pemanfaatan mineral zeolit di bidang pertanian dan lingkungan [abstrak]. Di dalam: Seminar Staf Jurusan Tanah, Fakultas Pertanian, IPB, 22 Maret 2000. <http://suwardi-abstrak.blogspot.com>. [26 Mei 2009].

- Taherzadeh MJ, Karimi K. 2008. Bioethanol: Market and production processes. Di dalam: Nag A, editor. *Biofuels Refining and Performance*. New York: McGraw-Hill. hlm 69-106.
- Tissler A, Unger KK, Schmidt H, penemu; Vereinigte Aluminium-Werke Aktiengesellschaft. 28 Jul 1992. Method for modifying A zeolite. US Patent 5 133 952.
- Treacy MMJ, Higgins JB. 2007. *Collection of Simulated XRD Powder Patterns for Zeolites*. Amsterdam: Elsevier.
- Ulfah EM, Yasnur FA, Istadi. 2006. *Optimasi Pembuatan Katalis Zeolit X dari Tawas, NaOH dan Water Glass Dengan Response Surface Methodology*. *Bul Chem React Eng Catal* 1: 26-32.
- Vaughan DEW, penemu; Exxon Research and Engineering Co. 13 Aug 1985. Process for direct synthesis of sodium-and potassium-containing zeolite A. US Patent 4 534 947.
- Wahyudi D. 2010. *Desain Proses Dehidrasi Bioetanol Menggunakan Zeolit Molecular sieve dengan Teknik Vacuum Swing Adsorption* [tesis]. Bogor: Program Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Wittcoff HA, Reuben BG, Plotkin JS. 2004. *Industrial Organic Chemicals*. Ed ke-2. New Jersey: J Wiley.
- Wyman CE. 1996. *Handbook on Bioethanol: Production and utilization*. USA: Taylor and Francis.
- Zhan X, Li JD, Chen J, Huang JQ. 2009. *Pervaporation of Ethanol/Water Mixtures With High Flux by Zeolite-Filled PDMS/PVDF Composite Membranes*. *Chin J Polym Sci* 27: 771-780.

PROFIL PENULIS



Khaidir, S.Si., M.Si. Lahir di Kandang, Lhokseumawe Tahun 1977. Pendidikan sarjana (S1) ditempuh di Jurusan Kimia Fakultas MIPA Universitas Syiah Kuala Banda Aceh, lulus Tahun 2001. Pendidikan Magister Sains (S2) diselesaikan pada Fakultas Teknologi Pertanian (FATETA) Institut Pertanian Bogor Program Studi Teknologi Industri Pertanian, lulus Tahun 2011. Guru Bantu Mata Pelajaran Kimia pada Madrasah Aliyah Muhammadiyah Lhokseumawe (2003 – 2007). Staf pengajar pada Fakultas Kesehatan Masyarakat (FKM) Universitas Muhammadiyah Aceh (2003 – 2007).

Dosen tidak tetap pada Fakultas Pertanian Universitas Almuslim Kabupaten Bireuen (2013 – 2014). Dosen tetap pada Jurusan Budidaya Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Malikussaleh Lhokseumawe dalam Mata Kuliah Teknologi Budidaya Tanaman Bioenergi, Kimia Pertanian, Biokimia Tanaman, Teknologi Panen dan Pascapanen, serta Teknologi Pengolahan Hasil Pertanian (2005 – sekarang). Menjabat sebagai Kepala Laboratorium Ilmu-Ilmu Dasar Pertanian pada Fakultas Pertanian Universitas Malikussaleh (2014 – 2025).

Menulis buku Produksi Kedelai pada Lahan Marjinal yang diterbitkan pada tahun 2017 oleh Sefa Bumi Persada Lhokseumawe. Bertindak sebagai editor pada buku Teknologi produksi kedelai pada tanah salin yang diterbitkan oleh Universitas Malikussaleh Press (Unimal Press). Penulis buku ajar berjudul **"Pengantar ilmu kimia dalam bidang pertanian"** yang diterbitkan oleh Sefa Bumi Persada pada tahun 2018 di Lhokseumawe.



Dr. Dwi Setyaningsih, S.TP., M.Si. lahir Purwokerto, 3 Januari 1970. Pendidikan sarjana ditempuh di Program Studi Teknologi Pangan dan Gizi, lulus Tahun 1993 Institut Pertanian Bogor. Pendidikan Magister Sains (S2) diselesaikan pada Program Studi Ilmu Pangan Institut Pertanian Bogor, lulus Tahun 1997. Pada tahun 2006, menyelesaikan pendidikan Doktorat pada Program Studi Biologi Institut Pertanian Bogor. Lulus Pengawai Negeri Sipil (PNS) di Universitas Jenderal Soedirman pada tahun 1997.

Dosen tetap pada Departemen Teknik Industri Pertanian (TIN) Fakultas Teknologi Pertanian IPB Tahun 2001 – sekarang. Unit Kerja Pusat Penelitian Surfactan dan Bioenergi (SBRC) Institut Pertanian Bogor (IPB University) (2006 – sekarang). Penulis Buku Analisis Sensori untuk Industri Pangan dan Agro yang diterbitkan oleh IPB Press pada Tahun 2010.

Pada Tahun 2019 memperoleh Penghargaan Riset/Inovasi yaitu 111 Inovasi Indonesia: Minyak Atsiri sebagai Bioaditif Solar untuk Mengurangi Emisi Gas Buang dan Konsumsi Bahan Bakar dan 115 Inovasi Indonesia: *Fat Replacer* Berbasis Minyak Sawit sebagai Pengganti Lemak Hewani dalam Produk Pangan Olahan diperoleh pada tahun 2023. Tahun 2025 terpilih sebagai salah satu inovasi paling prospektif pada pemilihan "117 INOVASI INDONESIA 2025" yang diselenggarakan oleh Business Innovation Center (BIC). Inovasi bertajuk "Etil Esther Minyak Sacha Inchi: Menjadi Cantik Alami Berkat Kacang".

Produk Riset/Inovasi yang telah dihasilkan antara lain: Minyak pala terpenless sebagai bahan aktif kosmetik antiaging; *Fat replacer*

dari minyak sawit sebagai pengganti lemak hewani; Monodiasil gliserol turunan sawit dari hasil esterifikasi gliserol dan PFAD; Sabun kesehatan dari jarak pagar; Bioetanol rumput laut; dan Bioetanol gel sebagai alternatif bahan bakar ramah lingkungan.

ZEOLIT ALAM TERMODIFIKASI

Buku ini mengungkap potensi besar Zeolit Alam Indonesia sebagai solusi lokal untuk kemandirian energi. Berfokus pada tahap paling kritis dalam produksi bioetanol yaitu dehidrasi buku ini membedah bagaimana batuan vulkanik mentah dapat direkayasa menjadi Molecular Sieve (saringan molekuler) tingkat tinggi.

Melalui teknik aktivasi dan modifikasi struktur mikro, zeolit alam mampu memisahkan air dari campuran azeotrop etanol dengan presisi skala atomik. Pembaca akan diajak memahami proses dari laboratorium hingga aplikasi industri, mencakup karakterisasi material canggih (XRD, SEM, BET) hingga sistem pemurnian yang efisien energi. Inilah panduan komprehensif bagi praktisi dan akademisi untuk mengubah kekayaan alam nusantara menjadi teknologi pemurnian bioetanol yang murah, ramah lingkungan, dan berstandar global.