p-ISSN: 1907-8056
e-ISSN: 2527-5410
AGROINTEK
Jurnal Teknologi Industri Pertanian
journal homepage: journal.trunojoyo.ac.id/agrointek

Teknologi konversi biomassa kelapa sawit (*palm kernel meal*) menjadi bioetanol secara enzimatis: tinjauan literatur

Serarifi Elagin Harahap[1,2*], Erliza Hambali[1], Erliza Noor[1], Khaswar Syamsu[1]

[1]*Teknik Industri Pertanian, IPB University, Bogor, Indonesia*
[2]*Pusat Penelitian Kelapa Sawit, Bogor, Indonesia*

Article history
Diterima:
24 Januari 2025
Diperbaiki:
25 Juni 2025
Disetujui:
26 Juli 2025

Keyword
Bioethanol; Enzymatic saccharification; Palm kernel meal; Renewable energy

ABSTRACT

The palm oil industry is a major agricultural sector in Indonesia. This sector produces a significant amount of biomass, including palm kernel meal (PKM), which has tremendous potential as a sustainable feedstock for second-generation bioethanol production. This review aims to explore the enzymatic conversion of PKM to bioethanol as an environmentally friendly and feasible alternative to fossil fuels. The scope of the study covers pretreatment, enzymatic saccharification, fermentation, and purification technologies, with an emphasis on strategies that optimise sugar release and ethanol yield. A literature review method was used, analysing publications from 2010 to 2025 sourced from Google Scholar and Web of Science, filtered based on their relevance to PKM utilisation and bioethanol production. The results show that PKM, which is rich in cellulose and hemicellulose, can be effectively hydrolysed using enzyme consortia that include endomannanase, β-mannosidase, and cellulase, achieving high sugar conversion rates. Pretreatment methods including autoclaving and hot water were found to increase enzyme accessibility, while fermentation through simultaneous saccharification and fermentation (SSF) showed higher ethanol yields compared to separate hydrolysis and fermentation (SHF). In addition, bioethanol purification through a combination of distillation and adsorption achieved a fuel purity of 99.5%. Overall, the enzymatic conversion of PKM into bioethanol not only provides renewable energy but also contributes to waste reduction.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

* Penulis korespondensi
Email: seraharahap96@gmail.com
DOI 10.21107/agrointek.v20i1.29029

PENDAHULUAN

Polusi udara dan pemanasan global menjadi perhatian utama di dunia, terutama akibat konsumsi bahan bakar fosil yang berlebihan. Bahan bakar fosil, seperti minyak bumi dan gas alam, telah menyumbang secara signifikan terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca, termasuk karbon dioksida (CO_2) dan nitrogen oksida (N_2O) (Rahimnejad et al. 2015). Biofuel atau bahan bakar nabati telah dikenal sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan dalam upaya mengurangi dampak lingkungan tersebut,. Salah satu jenis biofuel yang memiliki potensi besar adalah bioetanol, yang dapat digunakan sebagai campuran bahan bakar fosil seperti Pertamax (Sugiarto et al. 2018, Wibowo et al. 2019). Bioetanol memiliki keunggulan dengan tingkat kemurnian yang sangat tinggi, mencapai minimal 99,5%, yang menjadikan bioetanol bahan bakar yang efisien dan berpotensi mengurangi emisi gas rumah kaca. Pemerintah Indonesia telah mengeluarkan kebijakan melalui Peraturan Presiden Nomor 40 Tahun 2023 yang mendorong percepatan produksi bioetanol sebagai bahan bakar nabati, menunjukkan komitmen dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

Industri kelapa sawit menghasilkan limbah biomassa dalam jumlah besar, salah satunya adalah bungkil inti sawit atau *Palm Kernel Meal* (PKM). PKM merupakan produk samping dari proses ekstraksi minyak inti sawit, dan memiliki potensi besar sebagai bahan baku untuk produksi bioetanol. PKM kaya akan polisakarida, terutama mannan, yang dapat dikonversi menjadi gula pereduksi untuk kemudian difermentasi menjadi bioetanol. Kajian tentang komposisi PKM menunjukkan bahwa kandungan hemiselulosa mencapai 61,5% dari serat PKM, dengan komponen utama berupa mannan (57,8%) dan xilan (3,7%) (Sundu et al. 2024). Kandungan ini menjadikan PKM sebagai bahan baku yang potensial dalam proses produksi bioetanol generasi kedua. Berbeda dengan bioetanol generasi pertama yang diproduksi dari bahan pangan seperti pati dan gula, bioetanol generasi kedua dihasilkan dari lignoselulosa non-pangan seperti limbah pertanian, sehingga lebih berkelanjutan dan tidak bersaing dengan kebutuhan pangan.

Bahan baku bioetanol dapat diperoleh dari bahan yang mengandung gula, pati dan lignoselulosa. Produksi bioetanol dari lignoselulosa, termasuk PKM, merupakan salah satu solusi untuk meningkatkan nilai ekonomi limbah agroindustri. Meskipun demikian, rendahnya tingkat degradasi lignoselulosa menjadi tantangan utama dalam produksi bioetanol. Berbagai metode telah dikembangkan untuk memecah struktur lignoselulosa, baik melalui pendekatan fisik, kimia, maupun biologis. Salah satu metode yang semakin mendapat perhatian adalah penggunaan enzim dalam proses hidrolisis atau sakarifikasi. Proses enzimatik memiliki keunggulan dalam hal efisiensi energi, tidak memerlukan suhu dan pH yang ekstrem, serta menghasilkan produk samping yang lebih sedikit dibandingkan dengan metode kimia (Schläfle et al. 2017).

PKM memiliki sejumlah manfaat tambahan lainnya dalam konteks produksi bioetanol. Selain menghasilkan bioetanol, residu dari proses konversi PKM juga dapat dimanfaatkan sebagai protein mudah cerna untuk pakan ternak. PKM berpotensi mengurangi ketergantungan Indonesia terhadap impor pakan ternak, karena kandungan proteinnya yang tinggi sebesar 15-21%, (Zarei et al. 2014). Pemanfaatan hasil samping ini diharapkan dapat memberikan nilai tambah pada PKM, serta meningkatkan kelayakan ekonomi dari teknologi produksi bioetanol berbasis PKM.

Melalui pendekatan ini, pemanfaatan PKM sebagai bahan baku bioetanol tidak hanya berperan sebagai solusi untuk masalah limbah industri sawit, tetapi juga sebagai sumber energi terbarukan yang berpotensi menggantikan bahan bakar fosil. Selain itu, produksi bioetanol dari PKM juga sekaligus dapat mendukung keberlanjutan sektor peternakan melalui penyediaan pakan ternak lokal yang murah dan berkualitas tinggi.

METODE

Metode penulisan ilmiah ini menggunakan beberapa kata kunci yang dianggap berkaitan dengan topik yang dibahas seperti *bioethanol, enzymatic saccharification, palm kernel meal, renewable energy*. Literatur yang digunakan dalam penulisan ilmiah ini bersumber dari basis data *Google scholar* dan *Web of Science* (WOS) dengan tahun terbit sejak 2010 hingga 2025. Setelah itu dilakukan *screening* dengan cara membaca teks secara menyeluruh. Karya tulis ilmiah yang terseleksi digunakan sebagai dasar dalam menulis artikel ilmiah ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Palm kernel meal

Palm Kernel Meal (PKM) merupakan limbah padat yang dihasilkan dari proses ekstraksi minyak inti sawit. PKM sering digunakan dalam pakan ternak, terutama untuk ruminansia, karena kandungan nutrisi yang bermanfaat dan harganya yang lebih murah dibandingkan bahan pakan lainnya. Selain mengandung serat kasar yang cukup tinggi, PKM juga memiliki kandungan protein dan karbohidrat yang signifikan (Azizi et al. 2021).

PKM mengandung sekitar 14-21% protein kasar (CP) dan 12-20% serat kasar (CF), tergantung pada metode ekstraksi yang digunakan. Selain itu, PKM juga mengandung β-mannan, yaitu polisakarida non-pati (NSP) (Azizi et al. 2021). Kandungan β-mannan inilah yang membuat PKM memiliki potensi besar untuk digunakan dalam proses hidrolisis enzimatis, karena dapat diubah menjadi gula sederhana yang dapat difermentasi menjadi bioetanol.

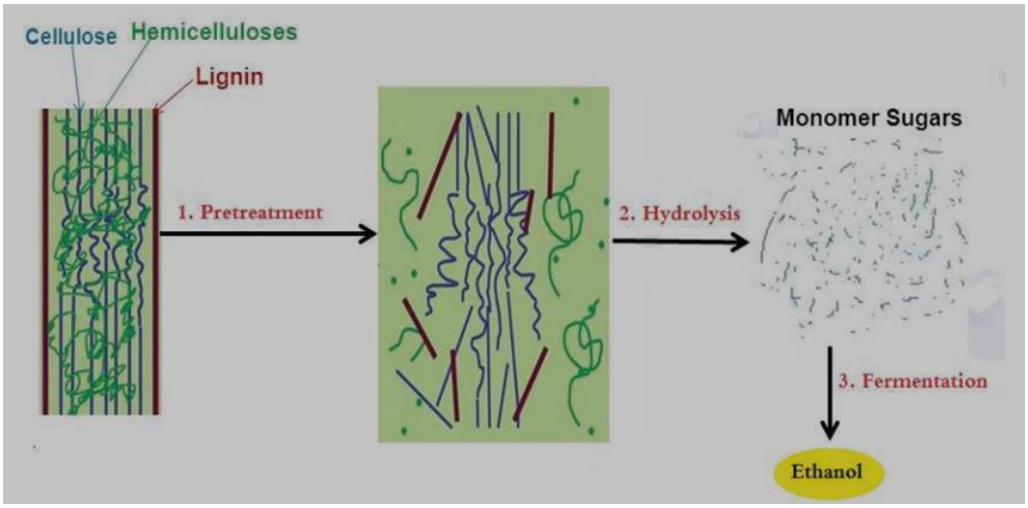
PKM mengandung sekitar 11,6% selulosa dan 61,5% hemiselulosa, dengan mannan sebagai komponen utama dari hemiselulosa. Mannan ini sangat penting karena dapat dipecah menjadi gula pereduksi yang berperan dalam proses fermentasi untuk produksi bioetanol (Madadi et al. 2017). Pemanfaatan PKM sebagai bahan baku bioetanol memberikan peluang tidak hanya untuk mengurangi limbah industri kelapa sawit, tetapi juga untuk menghasilkan bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan.

Teknologi dry grind process

Produksi etanol dari biomassa lignoselulosa mencakup tiga langkah utama: (1) perlakuan awal, (2) sakarifikasi/ hidrolisis enzimatik, dan (3) fermentasi (Maitan-Alfenas et al. 2015). Kemudian untuk menghasilkan bioetanol *fuel grade*, perlu dilakukan proses pemurnian agar mencapai standar bioetanol yang dapat diaplikasikan ke mesin kendaraan bermotor. Gambar 1 menunjukkan proses produksi etanol dari biomassa lignoselulosa. Untuk mengubah struktur biomassa serta keseluruhan komponen kimianya, diperlukan perlakuan awal yang sesuai untuk memfasilitasi akses enzim yang cepat dan efektif serta hidrolisis karbohidrat menjadi gula yang dapat difermentasi (Madadi et al. 2017).

Pretreatment dapat menyebabkan meningkatnya biaya proses, namun tahapan ini berfungsi untuk menghancurkan struktur lignin sehingga selulosa dan hemiselulosa dapat diakses oleh enzim. Hidrolisis enzimatik mengubah polisakarida menjadi gula monomer. Gula yang diperoleh dari hidrolisis dapat difermentasi menjadi etanol dan produk lain oleh mikroorganisme (Harner et al. 2015)

Dry Grind Process merupakan salah satu teknologi yang banyak digunakan dalam proses produksi bioetanol dari biomassa lignoselulosa, termasuk PKM. Teknologi ini melibatkan beberapa tahapan utama yang dirancang untuk mengonversi polisakarida yang terkandung dalam PKM, seperti selulosa dan hemiselulosa, menjadi gula sederhana yang dapat difermentasi menjadi bioetanol (Jørgensen et al. 2010).



Gambar 1 Proses produksi etanol dari biomassa (Madadi et al. 2017)

Tabel 1 Pengaruh berbagai jenis *pretreatment* terhadap monosakarida hasil hidrolisis

Pretreatment	**Manosa (%)**	**Glukosa (%)**	**Total Gula (g/l)**
Tanpa *pretreatment*	66,0	13,8	12,9
Dengan *pretreatment* Autoklaf	71,7	15,0	13,9
Dengan *pretreatment* Pemanasan	58,4	13,6	11,4

Tabel 2 Pengaruh *pretreatment* PKM terhadap monosakarida hasil hidrolisis

	Perolehan gula setelah hidrolisis enzimatik			
Pretreatment	Glukosa (g/L)	Xilosa (g/L)	Manosa (g/L)	Total Gula (g/l)
Tanpa *pretreatment*	27,34 ± 1,03	0,03 ± 0,00	60,44 ± 3,75	87,81± 4,78
Pretreatment Liquid Hot Water (LHW)	26,60 ± 0,12	0,03 ± 0,00	71,17 ± 1,17	97,81± 1,29

Dry Grind Process dimulai dengan penggilingan kering (*dry grinding*) dari PKM untuk mengecilkan ukuran partikel. Penggilingan ini penting untuk meningkatkan luas permukaan bahan dan memudahkan akses enzim yang digunakan dalam hidrolisis enzimatik. Setelah penggilingan, tahap berikutnya adalah *pretreatment*, yang bertujuan untuk memecah struktur lignoselulosa yang kompleks agar lebih mudah diakses oleh enzim. *Pretreatment* bisa melibatkan perlakuan fisika, kimia, atau kombinasi keduanya. Setelah *pretreatment*, dilakukan sakarifikasi/ hidrolisis enzimatik, yaitu tahap dimana enzim seperti selulase dan hemiselulase digunakan untuk menghidrolisis selulosa dan hemiselulosa menjadi gula sederhana, terutama glukosa dan mannosa. Gula tersebut kemudian difermentasi menggunakan mikroorganisme, seperti ragi (*Saccharomyces cerevisiae*), untuk menghasilkan bioetanol (Madadi et al. 2017).

Dry grind process dipilih karena kesederhanaannya dan efisiensi biaya. Teknologi ini tidak memerlukan banyak air, dan dapat langsung digunakan dalam skala besar. Penggunaan PKM dalam *dry grind process* memberikan dua kelebihan, yaitu produksi bioetanol dari sumber limbah yang melimpah dan nilai tambah melalui pengolahan produk samping seperti protein pada PKM yang bisa digunakan sebagai pakan ternak setelah proses fermentasi.

Pretreatment

Pretreatment pada PKM merupakan tahap penting untuk meningkatkan efisiensi konversi PKM menjadi bioetanol. Lignoselulosa dalam PKM memiliki struktur kompleks yang memerlukan penguraian agar enzim dapat mengakses komponen selulosa dan hemiselulosa dengan lebih efektif untuk diubah menjadi gula fermentasi seperti glukosa dan manosa.

Beberapa teknik *pretreatment* yang umum diterapkan termasuk metode fisik, kimia, dan termal. Salah satu metode yang sering digunakan adalah metode autoklaf, yaitu pemanasan pada suhu 126°C selama 11 menit. Metode ini terbukti dapat meningkatkan pelepasan gula selama hidrolisis enzimatik. Studi menunjukkan bahwa *pretreatment* pada suhu 126°C meningkatkan pelepasan mannosa hingga 71,7% dan glukosa sebesar 15% dari potensi teoritis (Tabel 1). Sebaliknya, penggunaan suhu lebih tinggi seperti 180°C tidak selalu memberikan hasil yang lebih baik, bahkan dapat menurunkan hasil gula karena degradasi termal (Cerveró et al. 2010)

Pretreatment juga berfungsi untuk mengurangi pengaruh lignin, yang dapat mengikat enzim dan mengurangi efisiensi hidrolisis. Kombinasi *pretreatment* termal dan enzim dapat meningkatkan hidrolisis mannan dalam PKM secara signifikan, menghasilkan lebih banyak gula yang dapat difermentasi menjadi bioetanol. Secara keseluruhan, pemilihan metode pretreatment yang optimal sangat penting untuk memaksimalkan produksi bioetanol dari PKM. *Pretreatment* dengan suhu moderat seperti *autoclaving* menawarkan keseimbangan optimal antara peningkatan aksesibilitas enzim dan minimalisasi degradasi gula, sehingga meningkatkan efisiensi konversi bioetanol dari PKM.

(Shukor et al. 2016) melakukan *pretreatment* pada PKM untuk meningkatkan produksi gula yang dapat difermentasi dari perlakuan enzimatik. Perlakuan *Liquid Hot Water* (LHW) terbukti efektif sebagai metode *pretreatment* berbiaya rendah untuk persiapan bahan lignoselulosa sebelum perlakuan enzimatik. Metode ini dilakukan dengan memanaskan PKM dalam air mendidih pada suhu 100°C selama 1 jam sebelum dilakukan hidrolisis enzimatik

Setelah perlakuan awal PKM dengan metode LHW, gula hidrolisat yang dihasilkan dari *pretreatment* PKM selanjutnya dihidrolisis oleh campuran tiga enzim b-glukosidase, selulase dan mannanase. Tabel 2 menunjukkan hasil yang diperoleh untuk gula monomer yang dilepaskan dari perlakuan awal LHW PKM. *Pretreatment* LHW menyebabkan sakarifikasi fraksi selulosa dan hemiselulosa dari kandungan lignoselulosa PKM. Berdasarkan Tabel 2, hidrolisis PKM yang telah diolah dengan LHW oleh gabungan tiga sediaan enzim menghasilkan 26,60 ± 0,12 g/L glukosa, 0,03 ± 0,00 g/L xilosa, dan 71,17 ± 1,17 g/L manosa dengan 97,81 ± 1,29 g/L total gula. Hidrolisis PKM dengan enzim yang sama namun tanpa perlakuan *pretreatment* LHW menghasilkan 27,34 ± 1,03 g/L glukosa, 0,03 ± 0,00 g/L xilosa, dan 60,44 ± 3,75 g/L manosa dengan 87,81 ± 4,78 g/L total gula. Hasil ini menunjukkan bahwa perlakuan awal LHW memiliki efek yang baik pada sakarifikasi kandungan mannan dari polisakarida PKM (Shukor et al. 2016).

Hidrolisis enzimatik

Beberapa hasil penelitian mengenai produksi bioetanol dari PKM dengan metode hidrolisis enzimatik telah dirangkum dalam Tabel 3. Teknologi sakarifikasi enzimatik dalam penelitian Jørgensen et al. (2010) melibatkan konsorsium enzim yakni endomannanase, β-mannosidase, selulase dengan rasio 30:10:1. Penelitian ini menggunakan *loading* enzim sebesar 2,3 mg protein/g PKM. Penelitian tersebut mampu menghasilkan sekitar 365 g gula (mannosa dan glukosa) per kilogram PKM dalam waktu 96 jam. Sebanyak 88% konversi mannan menjadi manosa dan 69% glukan/selulosa menjadi glukosa didapatkan dalam 192 jam. Hasil ini menunjukkan sinergi yang signifikan antar enzim, di mana campuran ini meningkatkan pelepasan manosa sebesar 30% dibandingkan penggunaan enzim individu.

Penelitian yang dilakukan oleh Cerveró et al. (2010) menggunakan hidrolisis enzimatik dengan *loading* enzim 10% (v/w) pada PKM yang telah mengalami *pretreatment*, menggunakan campuran enzim Mannaway dan Gammanase menunjukkan sinergi yang kuat, menghasilkan 63% mannan terhidrolisis dalam 24 jam.

Shukor et al. (2016) fokus pada hidrolisis PKM menggunakan kombinasi enzim Mannanase dan Glucanase dengan rasio pencampuran 1:1. Pada penelitian ini, konversi mannan menjadi manosa tercapai hingga 88% dalam 192 jam. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa *loading* enzim yang lebih tinggi meningkatkan konversi gula, selain itu penggunaan enzim campuran memberikan hasil yang lebih optimal dibandingkan enzim tunggal.

Secara keseluruhan, ketiga penelitian ini menekankan pentingnya penggunaan campuran enzim untuk mengoptimalkan hidrolisis enzimatik PKM. Hasil penelitian Cerveró et al. (2010) menunjukkan hasil gula tertinggi dalam waktu yang relatif lebih singkat.

Tabel 3 Teknologi konversi PKM menjadi bioethanol dengan hidrolisis enzimatik

Teknologi	Hasil	Referensi
Konsorsium enzim endomannanase/β-mannosidase/cellulase (30:10:1)	88% konversi manan menjadi manosa dan 69% glukan/selulosa menjadi glukosa dalam 192 jam	Jørgensen et al. (2010)
Campuran Gammanase dan Mannaway (1:1)	87% konversi manosa atau total 365 g gula C6 (galaktosa, glukosa, manosa) per kg of PKM dalam 96 jam	Cerveró et al. (2010)
b-glukosidase, selulase dan mannanase	•87,81± 4,78 g/L total gula selama 72 jam tanpa *pretreatment* •97,81 ± 1,29 g/L total gula selama 72 jam dengan *pretreatment*	Shukor et al. (2016)

Tabel 4 Teknologi konversi PKM menjadi bioethanol dengan berbagai mikroba fermentasi

Mikroba Fermentasi	*Separate Hydrolisis and Fermentation* (SHF)	*Simultaneous Saccharification and Fermentation* (SSF)	Referensi
Saccharomyces cerevisiae	rendemen bioetanol 150±2 g/kg PKM inkubasi selama 72 jam	rendemen bioetanol 200±2 g/kg PKM inkubasi selama 168 jam	Jørgensen et al. (2010)
Saccharomyces cerevisiae	-	Rendemen bioetanol 0,48 g/g atau 95% rendemen teoritis selama 19 jam	Cerveró et al. (2010)
Clostridium saccharoperbutylacetonicum N1-4 (ATCC 13564)	rendemen 0,19 ± 0,06 g/L inkubasi selama 168 jam anaerobik	-	Shukor et al. (2016)

Fermentasi

Rangkuman beberapa penelitian yang terdapat pada Tabel 4 mengeksplorasi berbagai teknologi fermentasi dalam konversi PKM menjadi bioetanol. Masing-masing penelitian menggunakan metode fermentasi yang berbeda, yang dapat mempengaruhi rendemen etanol yang dihasilkan.

Jørgensen et al. (2010) menggunakan metode *Separate Hydrolysis and Fermentation* (SHF) dan *Simultaneous Saccharification and Fermentation* (SSF). Mikroba yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Saccharomyces cerevisiae*. Ragi ini merupakan ragi yang umum digunakan dalam fermentasi etanol karena kemampuannya untuk mengkonversi gula C6 seperti glukosa dan manosa menjadi etanol. Waktu fermentasi yang diterapkan adalah selama 165 jam dengan menggunakan 10% *dry matter* PKM. Teknologi fermentasi SHF menghasilkan rendemen bioetanol sebesar 150±2 g/kg PKM dengan inkubasi selama 72 jam. Hasil lebih tinggi yaitu rendemen bioetanol 200±2 g/kg PKM dengan inkubasi selama 168 jam didapatkan dengan teknologi SSF. Kelebihan SSF dalam penelitian ini adalah kemampuannya untuk mengurangi waktu proses dengan menggabungkan hidrolisis dan fermentasi dalam satu tahap. Penelitian ini menghasilkan etanol dengan rendemen yang mencapai sekitar 65–70% dari karbohidrat yang terkandung dalam PKM. Hasil etanol tersebut tergolong tinggi dengan adanya sinergi dari penggunaan enzim dan fermentasi.

Cerveró et al. (2010) menggunakan metode *Separate Hydrolysis and Fermentation* (SHF), dimana hidrolisis enzimatik dilakukan terlebih dahulu, diikuti oleh proses fermentasi. Mikroorganisme yang digunakan adalah *Saccharomyces cerevisiae*. Rendemen etanol yang dihasilkan dalam penelitian ini adalah 0,48 g/g atau 95% rendemen teoritis selama 19 jam, dengan konsentrasi etanol dalam medium fermentasi mencapai 12,5 g/L. Metode SHF memisahkan dua tahap penting (hidrolisis dan fermentasi), yang memungkinkan kontrol lebih baik atas masing-masing proses.

Shukor et al. (2016) menggunakan metode *Separate Hydrolysis and Fermentation* (SHF) dengan menggunakan bakteri *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4 (ATCC 13564) sebagai agen fermentasi. Fermentasi berlangsung selama 168 jam dan menghasilkan rendemen 0,19 ± 0,06 g/L inkubasi selama 168 jam secara anaerobik.

Secara keseluruhan, (Cerveró et al. 2010) menghasilkan rendemen bioetanol tertinggi dengan metode SHF, sedangkan Jørgensen et al. (2010) lebih baik dengan metode SSF, meskipun dengan rendemen etanol yang sedikit lebih rendah. Kedua penelitian ini memanfaatkan *Saccharomyces cerevisiae* yang lebih umum dan efektif sebagai agen fermentasi.

Pemurnian bioetanol fuel grade

Proses pemurnian bioetanol hasil fermentasi yang umumnya hanya mencapai kemurnian 10-15%, seperti yang dihasilkan dari bahan baku biomassa seperti PKM, memerlukan peningkatan kemurnian menjadi 99,5% agar dapat digunakan sebagai bahan bakar sesuai standar [17]. Beberapa metode pemurnian yang umum digunakan

termasuk distilasi, distilasi vakum, distilasi azeotropik, serta adsorpsi untuk mencapai kemurnian yang lebih tinggi (Saputro et al. 2023).

Distilasi sederhana adalah metode dasar yang memanfaatkan perbedaan titik didih antara etanol dan air. Adanya sifat azeotropik pada campuran etanol-air di konsentrasi sekitar 96%, metode ini hanya mampu meningkatkan kemurnian hingga batas tersebut. Metode tambahan seperti adsorpsi atau distilasi dengan penggunaan entrainer (zat tambahan) dibutuhkan untuk memecah ikatan azeotropik (Yunus et al. 2020).

Distilasi azeotropik menggunakan zat tambahan (*entrainer*) untuk memecah ikatan azeotrop pada etanol-air. Metode ini memiliki kelemahan, yaitu membutuhkan penggunaan energi tinggi dan investasi teknologi yang lebih mahal. Distilasi molekuler, yang melibatkan penggunaan tekanan rendah untuk memisahkan komponen volatil, juga memerlukan biaya investasi dan operasi yang tinggi, terutama karena membutuhkan peralatan khusus dan penggunaan energi yang besar (Saputro et al., 2023)(Saputro et al., 2023).

Distilasi dengan adsorpsi, seperti yang diusulkan oleh Villarul et al. (2017), menggunakan adsorben seperti CaO, yang dapat mengikat molekul air secara efektif sehingga meningkatkan kemurnian etanol hingga lebih dari 99,7%. Metode ini relatif lebih murah dibandingkan dengan distilasi azeotropik atau molekuler karena tidak memerlukan penggunaan *entrainer* atau teknologi yang rumit, serta dapat dijalankan pada suhu yang lebih rendah, yang dapat menghemat energi. Metode distilasi-adsorpsi juga fleksibel dalam hal penggunaan bahan adsorben seperti zeolit, bentonit, atau karbon aktif, yang masing-masing memiliki karakteristik daya serap terhadap air yang berbeda.

Dari segi efisiensi energi dan biaya, kombinasi tahapan distilasi sederhana dan dilanjutkan dengan tahap adsorpsi menggunakan adsorben menawarkan solusi yang lebih ekonomis dan efisien dibandingkan distilasi azeotropik atau molekuler. Metode ini memungkinkan peningkatan kadar etanol tanpa memerlukan perubahan signifikan dalam infrastruktur atau investasi yang besar. Penggunaan dua tahap pemurnian, yaitu distilasi sederhana diikuti oleh proses adsorpsi, menunjukkan hasil yang baik untuk meningkatkan kemurnian etanol hingga mencapai 99,7%, sehingga memenuhi standar bahan bakar tanpa perlu mengandalkan teknologi yang lebih kompleks (Villarul et al. 2017).

Metode distilasi sederhana yang dimodifikasi dengan adsorpsi, merupakan pilihan terbaik untuk memurnikan bioetanol dari PKM dari kadar sekitar 20% menjadi 99,5%. Metode ini tidak hanya ekonomis tetapi juga efisien secara teknis dan energi, serta lebih mudah diterapkan dibandingkan dengan distilasi azeotropik atau molekuler. Ketersediaan informasi hasil percobaan metode ini terhadap produk fermentasi PKM secara enzimatis masih sangat terbatas, sehingga penelitian lebih lanjut perlu dilakukan.

KESIMPULAN

PKM berpotensi untuk menjadi bahan baku bioetanol karena tingginya kandungan selulosa dan hemiselulosa. Teknologi *Dry grind process* memungkinkan PKM untuk secara efektif dikonversi menjadi bioetanol dalam skala besar. Proses utama konversi PKM menjadi bioetanol mencangkup perlakuan awal, sakarifikasi/ hidrolisis, fermentasi, dan pemurnian.

Hasil tinjauan menunjukkan perlakuan awal PKM yakni *pretreatment* autoklaf maupun *Liquid Hot Water* dapat menghasilkan rendemen etanol yang tinggi. Tahapan sakarifikasi/ hidrolisis yang dapat menghasilkan gula pereduksi tinggi adalah dengan proses hidrolisis enzimatik menggunakan konsorsium enzim endomannanase, β-mannosidase, dan cellulase. Proses enzimatis tidak memerlukan suhu tinggi atau bahan kimia agresif seperti pada metode kimia, sehingga lebih ramah lingkungan karena membutuhkan energi yang lebih rendah dan menghasilkan produk samping yang lebih sedikit. Konsorsium enzim endomannanase, β-mannosidase, dan cellulase mampu mengonversi manan menjadi manosa dan selulosa menjadi glukosa secara lebih efisien dibandingkan enzim tunggal, karena kombinasi ini secara spesifik menarget struktur lignoselulosa PKM yang didominasi hemiselulosa dengan mannan sebagai komponen utamanya.

Proses *simultaneous saccharification and fermentation* (SSF) juga diketahui dapat memberikan yield bioetanol yang lebih tinggi. Proses pemurnian etanol dapat dilakukan dengan memodifikasi teknik distilasi dan adsorbsi dalam sebuah rangkaian sistem pemurnian untuk menghasilkan bioetanol *fuel grade*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada komisi pembimbing yang telah memberi dukungan dan motivasi dalam menyelesaikan karya ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

Azizi, M. N., T. C. Loh, H. L. Foo, and E. L. T. Chung. 2021, February 1. Is palm kernel cake a suitable alternative feed ingredient for poultry? MDPI AG.

Cerveró, J. M., P. A. Skovgaard, C. Felby, H. R. Sørensen, and H. Jørgensen. 2010. Enzymatic hydrolysis and fermentation of palm kernel press cake for production of bioethanol. *Enzyme and Microbial Technology* 46(3–4):177–184.

Harner, N. K., X. Wen, P. K. Bajwa, G. D. Austin, C. Y. Ho, M. B. Habash, J. T. Trevors, and H. Lee. 2015, January 1. Genetic improvement of native xylose-fermenting yeasts for ethanol production. Springer Verlag.

Jørgensen, H., A. R. Sanadi, C. Felby, N. E. K. Lange, M. Fischer, and S. Ernst. 2010. Production of ethanol and feed by high dry matter hydrolysis and fermentation of Palm kernel press cake. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 161(1–8):318–332.

Madadi, M., P. Chen, and A. Abbas. 2017. Advances in Genetic Manipulation of Lignocellulose to Reduce Biomass Recalcitrance and Enhance Biofuel Production in Bioenergy Crops. *Journal of Plant Biochemistry & Physiology* 05(02).

Maitan-Alfenas, G. P., E. M. Visser, and V. ria M. Guimarães. 2015. Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass: Converting food waste in valuable products. Elsevier Ltd.

Rahimnejad, M., A. Adhami, S. Darvari, A. Zirepour, and S. E. Oh. 2015, September 1. Microbial fuel cell as new technol ogy for bioelectricity generation: A review. Elsevier B.V.

Saputro, E. A., A. A. Bobsaid, M. C. Hutabarat, D. Ariyanti, and R. Panjaitan. 2023. Pengembangan metode pemurnian bioetanol dari berbagai jenis bahan baku: Kajian Pustaka. *Jurnal Teknik Kimia* 29(1):19–28.

Schläfle, S., T. Senn, P. Gschwind, and R. Kohlus. 2017. Feasibility and energetic evaluation of air stripping for bioethanol production. *Bioresource Technology* 231:109–115.

Shukor, H., P. Abdeshahian, N. K. N. Al-Shorgani, A. A. Hamid, N. A. Rahman, and M. S. Kalil. 2016. Saccharification of polysaccharide content of palm kernel cake using enzymatic catalysis for production of biobutanol in acetone-butanol-ethanol fermentation. *Bioresource Technology* 202:206–213.

Sugiarto, B., C. Setyo Wibowo, A. Zikra, A. Budi, and T. Mulya. 2018. Characteristic of gasoline fuels in Indonesia blend with varying percentages of bioethanol. Page *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences.

Sundu, B., A. Asril, H. Hafsah, and F. Saloko. 2024. Enzymatic hydrolyzation of fermented palm kernel meal with the addition of ammonium sulfate in poultry diet. Page *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Institute of Physics.

Villarul, T. N., S. Reni Yenti, M. Jurusan Teknik Kimia, and D. Jurusan Teknik Kimia. 2017. *Pemurnian Bioetanol Hasil Fermentasi Nirah Nipah Menggunakan Proses Destilasi-Adsorpsi Menggunakan Adsorben CaO*. Page *Jom FTEKNIK*.

Wibowo, C. S., B. Sugiarto, A. Zikra, A. Budi, T. Mulya, and M. Muchar. 2019. The effect of bioethanol-varying gasoline blends on performance and emission of SI engine 150 CC. Page *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics Inc.

Yunus, Hamsina, and M. Tang. 2020. Produksi Bioetanol dari Nira Aren 1(ISSN 2443 2369).

Zarei, M., A. Ebrahimpour, A. Abdul-Hamid, F. Anwar, F. A. Bakar, R. Philip, and N. Saari. 2014. Identification and characterization of papain-generated antioxidant peptides from palm kernel cake proteins. *Food Research International* 62:726–734.