

**KHAMIR PENGHASIL LIPID YANG MEMANFAATKAN BIOMASSA
LIGNOSELULOSA UNTUK PRODUKSI BIODIESEL**
**LIPID-PRODUCING YEASTS UTILIZING LIGNOCELLULOSIC BIOMASS
FOR BIODIESEL PRODUCTION**

Fitha Febrilia Ruli

Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Hasanuddin
Jl. Perintis Kemerdekaan KM. 10, Tamalanrea, Makassar

Corresponding author: fithafruli@unhas.ac.id

Abstrak

Biomassa lignoselulosa merupakan sumber karbon terbarukan yang melimpah, dan memiliki potensi besar dalam produksi biodiesel oleh khamir *oleaginous*. Khamir *oleaginous* mampu mengakumulasi lipid dalam jumlah tinggi ketika ditumbuhkan pada biomassa lignoselulosa, yang terutama mengandung glukosa dan xilosa. Namun, struktur kompleks biomassa lignoselulosa memerlukan tahap *pretreatment* dan hidrolisis untuk melepaskan gula terfermentasi. Proses ini sering kali menghasilkan produk sampingan berupa inhibitor seperti furfural, 5-hydroxymethylfurfural (HMF), dan asam asetat, yang dapat menghambat pertumbuhan khamir. Oleh karena itu, khamir *oleaginous* yang dapat mengasimilasi glukosa dan xilosa secara simultan dan toleran terhadap inhibitor dapat memanfaatkan substrat tersebut dengan optimal. Tinjauan ini membahas spesies khamir yang dapat memanfaatkan hidrolisat lignoselulosa sebagai substrat pertumbuhan, jenis dan komposisi gula yang tersedia, mekanisme asimilasi gula, serta dampak inhibitor terhadap produksi lipid. Tinjauan ini diharapkan memberikan pemahaman komprehensif mengenai potensi dan tantangan penggunaan biomassa lignoselulosa dalam produksi biodiesel oleh khamir *oleaginous*.

Kata Kunci: Biomassa lignoselulosa, khamir *oleaginous*, lipid, inhibitor, biodiesel

Abstract

Lignocellulosic biomass is an abundant and renewable carbon source with great potential for biodiesel production by oleaginous yeasts. These yeasts can accumulate high amounts of lipids when grown on lignocellulosic biomass, which primarily consists of glucose and xylose. However, the complex structure of lignocellulosic biomass requires pretreatment and hydrolysis steps to release fermentable sugars. This process often produces by-products in the form of inhibitors such as furfural, 5-hydroxymethylfurfural (HMF), and acetic acid, which can inhibit yeast growth. Therefore, oleaginous yeasts capable of simultaneously assimilating glucose and xylose and are tolerant to inhibitors, are needed to optimally utilize this substrate. This review discusses yeast species that can utilize lignocellulosic hydrolysates for growth, the types and compositions of available sugars, the mechanisms of sugar assimilation, and the impacts of inhibitors on lipid production. This review aims to provide a comprehensive understanding of the potential and challenges of using lignocellulosic biomass for biodiesel production by oleaginous yeast.

Keywords: Lignocellulosic biomass, oleaginous yeast, lipid, inhibitor, biodiesel

Pendahuluan

Kebutuhan energi secara global mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan populasi manusia dan kegiatan industrialisasi. Namun, ketersediaan energi saat ini tidak mampu memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat (Babatunde et al., 2025), memungkinkan habisnya bahan bakar fosil di masa depan. Selain itu, penggunaan bahan bakar fosil juga berdampak negatif terhadap lingkungan, seperti peningkatan emisi gas rumah kaca, polusi air, serta pelepasan gas berbahaya (Cherwoo et al., 2023). Biodiesel yang bersifat *biodegradable* dan berasal dari bahan organik, memiliki sifat fisik dan kimia yang menyerupai bahan bakar diesel, sehingga berpotensi untuk menggantikan bahan bakar fosil (Khalaf et al., 2024; Kumar Singh et al., 2024).

Setelah biodiesel generasi pertama (minyak nabati) dan generasi kedua (minyak non-pangan), penelitian saat ini berfokus pada biodiesel generasi ketiga yang menggunakan *single cell oils* (SCO) yang dihasilkan oleh mikroorganisme. SCO memiliki keunggulan, seperti siklus pertumbuhan mikroorganisme yang singkat, kandungan lipid yang tinggi, tidak memerlukan lahan yang luas untuk kultivasi, serta tidak bergantung pada cuaca dan iklim (Subramaniam et al., 2010). Mikroorganisme penghasil SCO dikenal sebagai mikroorganisme *oleaginous*, yang mampu mengakumulasi lipid lebih dari 20% berat kering biomasanya (Ratledge & Wynn, 2002). Namun, produksi SCO menggunakan substrat pertumbuhan yang menyumbang 50-80% biaya produksi. Oleh karena itu, penggunaan substrat yang terjangkau dan ramah lingkungan, seperti biomassa lignoselulosa berpotensi dalam meningkatkan efisiensi produksi lipid oleh khamir *oleaginous*.

Biomassa lignoselulosa merupakan sumber karbon terbarukan yang melimpah di alam, biaya pengolahan relatif rendah, dan berpotensi besar dalam mendukung pengelolaan limbah organik secara berkelanjutan. Komponen utamanya berupa gula C5 dan C6, dapat dimanfaatkan oleh sebagai substrat pertumbuhan khamir *oleaginous*. Mikroorganisme ini mampu mengakumulasi lipid secara *de novo*, menghasilkan (TAG) sebagai bahan baku biodiesel (Kumar et al., 2017). Namun, struktur kompleks biomassa lignoselulosa memerlukan tahap *pretreatment* dan hidrolisis untuk meningkatkan ketersediaan gula terfermentasi, yang seringkali menghasilkan senyawa inhibitor seperti asam asetat, furfural, 5-hydroxymethylfurfural (HMF), dan vanilin. Senyawa ini menghambat pertumbuhan khamir dan mengurangi efisiensi konversi lipid (Poontawee et al., 2017). Meskipun studi terdahulu banyak mengeksplorasi SCO dari gula murni, penelitian tentang pemanfaatan langsung biomassa lignoselulosa masih terbatas. Oleh karena itu, strain mikroorganisme dengan tingkat toleransi yang tinggi terhadap inhibitor dapat memanfaatkan substrat ini secara efisien. Tinjauan ini mengkaji spesies-spesies khamir *oleaginous* dan efektivitasnya dalam memanfaatkan biomassa lignoselulosa sebagai sumber karbon, serta mengidentifikasi tantangan dan strategi pemilihan strain untuk aplikasi biodiesel.

Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan *mini review* yang menyajikan tinjauan sistematis terhadap artikel-artikel ilmiah yang relevan mengenai spesies khamir *oleaginous* yang menggunakan biomassa lignoselulosa sebagai substrat pertumbuhan dalam produksi biodiesel. Artikel yang digunakan sebagai referensi dalam tinjauan ini diperoleh melalui pencarian pada laman *Science Direct.com* pada rentang waktu publikasi 2015-2024, kemudian diseleksi berdasarkan relevansi dan kesesuaiannya dengan topik yang

dibahas. Kata kunci yang digunakan adalah “*oleaginous yeast*”, “*lignocellulosic biomass*”, dan “*biodiesel production*”.

Hasil Dan Pembahasan

Hasil

Berbagai spesies khamir *oleaginous* dilaporkan mampu mengakumulasi lipid dalam jumlah tinggi ketika ditumbuhkan pada substrat berbasis biomassa lignoselulosa. Biomassa jenis ini, seperti ampas tebu, jerami, dan kulit pisang, menawarkan potensi besar sebagai substrat produksi lipid berkelanjutan karena ketersediaannya melimpah, biaya rendah, dan kandungan gula terfermentasi yang tinggi (Chintagunta et al., 2021). Namun, komposisi gula dan metode *pretreatment* yang digunakan dapat mempengaruhi efisiensi konversi substrat menjadi lipid oleh khamir *oleaginous*.

Tabel 1 menyajikan perbandingan jumlah biomassa dan kandungan lipid yang dihasilkan oleh khamir *oleaginous* ketika ditumbuhkan pada biomassa lignoselulosa. Substrat yang digunakan meliputi kulit pisang, jerami gandum, ampas jagung, dan biomassa lainnya. Berdasarkan data yang diperoleh dari berbagai penelitian, *Rhodotorula glutinis* menghasilkan biomassa dan kandungan lipid tertinggi ($34,82 \text{ gL}^{-1}$ dan $13,18 \text{ gL}^{-1}$) ketika menggunakan hidrolisat ampas tebu, meskipun kandungan lipidnya lebih rendah (37,8%). Selain itu, *Cryptococcus* sp. yang ditumbuhkan pada hidrolisat kulit pisang hanya menghasilkan kandungan lipid terendah ($1,12 \text{ gL}^{-1}$) di antara semua spesies khamir. Pada hidrolisat rumput buluh, produksi lipid tertinggi dihasilkan oleh *Lipomyces starkeyi* ($4,8 \text{ gL}^{-1}$), dibandingkan spesies lain yang ditumbuhkan pada substrat yang sama. Temuan ini menekankan bahwa spesies khamir dan jenis substrat lignoselulosa sangat mempengaruhi jumlah biomassa dan kandungan lipid yang dihasilkan.

Tabel 1. Produksi lipid oleh khamir *oleaginous* pada substrat biomassa lignoselulosa

Spesies khamir	Substrat	Mode kultur	Biomassa (gL^{-1})	Konsentrasi lipid (gL^{-1})	Kandungan lipid (% w/w)	Referensi
<i>Rhodospiridium kratochvilovae</i>	Ekstrak air daging buah <i>Cassia fistula</i> L.	Batch	8,9	4,73	53,18	(Patel et al., 2015)
<i>Cryptococcus</i> sp.	Hidrolisat kulit pisang	Batch	3,3	1,12	34	(Han et al., 2019)
<i>Rhodotorula taiwanensis</i>	Hidrolisat ampas jagung	Batch	14,9	-	50,1	(Miao et al., 2020)
<i>Cutaneotrichosporon oleaginosus</i>	Hidrolisat jerami gandum	Batch	15,86	-	47	(Shaigani et al., 2021)
<i>Rhodotorula glutinis</i>	Hidrolisat ampas tebu	Batch	34,82	13,18	37,8	(Ngamsirisomsakul et al.,

<i>Lipomyces starkeyi</i>	Hidrolisat rumput buluh (<i>Arundo donax</i> L.)	Batch	7,0	4,8	68	2021) (Cianchetti et al., 2022)
<i>Rhodospiridiobolus azoricus</i>	Hidrolisat rumput buluh (<i>Arundo donax</i> L.)	Batch	2,4	1,7	71	(Cianchetti et al., 2022)
<i>Cutaneotrichosporon oleaginosum</i>	Hidrolisat rumput buluh (<i>Arundo donax</i> L.)	Batch	1,7	1,0	56	(Cianchetti et al., 2022)
<i>Rhodotorula glutinis</i>	Hidrolisat rumput buluh (<i>Arundo donax</i> L.)	Batch	1,4	0,8	54	(Cianchetti et al., 2022)
<i>Rhodotorula graminis</i>	Hidrolisat rumput buluh (<i>Arundo donax</i> L.)	Batch	2,0	1,0	51	(Cianchetti et al., 2022)
<i>Metschnikowia pulcherrima</i>	Hidrolisat Ryegrass	Batch	23,7	-	37,03	(Guler et al., 2024)
<i>Rhodospiridium toruloides</i>	Hidrolisat jerami jagung	Batch	11,5	6,1	53,1	(Patel et al., 2015)

"-"= data tidak tersedia atau tidak dicantumkan dalam sumber

Kemampuan khamir *oleaginous* juga sangat dipengaruhi oleh komposisi dan konsentrasi gula yang tersedia dalam substrat. Selain itu, metode *pretreatment* yang digunakan mempengaruhi ketersediaan gula terfermentasi dan potensi terbentuknya inhibitor yang dapat menghambat pertumbuhan khamir. Tabel 2 menunjukkan konsentrasi gula utama dan total gula pereduksi dari berbagai substrat biomassa lignoselulosa, serta metode *pretreatment* yang digunakan. Glukosa dan xilosa merupakan gula dominan pada sebagian besar substrat, dengan konsentrasi yang berbeda tergantung pada jenis substrat dan metode *pretreatment* yang digunakan. Hidrolisat ampas tebu yang diperoleh melalui *alkaline pretreatment* menghasilkan glukosa tertinggi (95 gL^{-1}), sehingga merupakan substrat potensial untuk produksi lipid. Hidrolisat ampas jagung didominasi oleh xilosa ($41,6 \text{ gL}^{-1}$), sedangkan ekstrak air daging buah *Cassia fistula* L. yang diperoleh melalui *mild boiling* menghasilkan total gula pereduksi $47,25 \text{ gL}^{-1}$ dan didominasi oleh glukosa dan fruktosa. Data ini menunjukkan pentingnya pemilihan substrat dan metode *pretreatment* yang sesuai dengan kemampuan metabolisme khamir.

Hidrolisat sering kali mengalami proses dilusi untuk mencapai konsentrasi gula optimal yang mendukung pertumbuhan dan produksi lipid oleh khamir *oleaginous*. Hidrolisat ampas jagung sebagai substrat pertumbuhan *Rhodotorula taiwanensis*

didilusi hingga total gula mencapai 4% (0,66% glukosa dan 3,34% xilosa) untuk menghindari stres osmotik akibat konsentrasi gula tinggi yang dapat menghambat pertumbuhan dan produksi lipid.

Tabel 2. Konsentrasi gula dan metode pretreatment/ekstraksi pada substrat biomassa lignoselulosa

Substrat	Glukosa (gL ⁻¹)	Xilosa (gL ⁻¹)	Arabinosa (gL ⁻¹)	Fruktosa (gL ⁻¹)	Total gula pereduksi (gL ⁻¹)	Metode Pretreatment	Referensi
Ekstrak air daging buah <i>Cassia fistula</i> L.	29,45 ± 0,17	3,87 ± 0,73	-	17,98 ± 0,39	47,25 ± 0,34	<i>Mild boiling</i>	(Patel et al., 2015)
Hidrolisat kulit pisang	4,5	-	-	18,1	-	<i>Dilute sulfuric acid pretreatment</i>	(Han et al., 2019)
Hidrolisat ampas jagung	8.83 ± 0.56	41.62 ± 0.20	-	-	-	<i>Dilute sulfuric acid pretreatment</i>	(Miao et al., 2020)
Hidrolisat jerami gandum	27,5 ± 0,3	14,0 ± 0,2	-	-	-	Hidrolisat komersial siap pakai	(Shaigani et al., 2021)
Hidrolisat ampas tebu	95	25	-	-	-	<i>Alkaline pretreatment</i>	(Ngamsirisomsakul et al., 2021)
Hidrolisat rumput buluh (<i>Arundo donax</i> L.)	-	-	-	-	57 ¹	<i>Alkaline pretreatment</i>	(Cianchetta et al., 2022)
Hidrolisat <i>Ryegrass</i>	40,06 ± 0,99	14,02 ± 0,18	2,40 ± 0,11	-	-	<i>Dilute alkaline pretreatment</i>	(Guler et al., 2024)
Hidrolisat jerami jagung	26	-	-	-	46	<i>Alkaline storage pretreatment</i>	(Kamal et al., 2024)

¹Nilai total gula pereduksi diperoleh dari *reducing sugars content* yang dilaporkan oleh Cianchetta et al. (2022), dianggap ekuivalen untuk keperluan tabel ini. Beberapa studi tidak mencantumkan nilai standar deviasi.

Pada Tabel 1, produksi lipid tertinggi ($13,18 \text{ gL}^{-1}$) oleh *Rhodotorula glutinis* yang ditumbuhkan pada substrat ampas tebu dengan konsentrasi glukosa 95 gL^{-1} . Substrat ini tidak dilaporkan mengandung inhibitor, sehingga glukosa yang tinggi dapat dimanfaatkan secara optimal untuk sintesis lipid. Sementara itu, *Cryptococcus* sp. hanya mampu mengakumulasi $1,12 \text{ gL}^{-1}$ lipid ketika ditumbuhkan pada hidrolisat kulit pisang, yang dilaporkan mengandung furfural berdasarkan analisis kualitatif (Han et al., 2019).

Pembahasan

Penggunaan khamir *oleaginous* dalam produksi SCO sebagai bahan baku biodiesel menawarkan keunggulan seperti efisiensi produksi biodiesel. Biomassa lignoselulosa umumnya mengandung gula utama, yaitu glukosa dan xilosa, serta gula lainnya seperti fruktosa dan arabinosa (Chaabane & Marchal, 2013). Konsentrasi dan komposisi gula dalam biomassa lignoselulosa mempengaruhi produksi lipid oleh khamir *oleaginous*. Akumulasi lipid oleh *Rhodotorula glutinis* mencapai $13,18 \text{ gL}^{-1}$ (Tabel 1) ketika ditumbuhkan pada hidrolisat ampas tebu dengan konsentrasi glukosa tinggi (95 gL^{-1} ; Tabel 2). Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi gula yang tinggi pada substrat berkorelasi positif dengan produksi lipid, serta tidak menghambat pertumbuhan *Rhodotorula glutinis*. Konsentrasi glukosa yang tinggi meningkatkan fluks karbon menuju jalur glikolisis untuk menghasilkan piruvat. Selanjutnya, piruvat dioksidasi menjadi asetil-KoA, yang merupakan prekursor biosintesis lipid, dan menjadi asam lemak melalui jalur *fatty acid synthase* (FAS) menjadi triasilgliserol (TAG), komponen utama lipid penyusun biodiesel (Ratledge, 2004).

Meski konsentrasi gula yang tinggi dapat meningkatkan produksi lipid, kondisi ini juga berisiko menghambat pertumbuhan khamir. Juanssilfero et al. (2018b) melaporkan pertumbuhan beberapa spesies khamir *oleaginous* pada substrat dengan konsentrasi gula yang tinggi terhambat akibat adanya stres osmotik. Konsentrasi gula yang tinggi pada fase awal pertumbuhan dapat menghambat pembentukan biomassa. Akibatnya aktivitas siklus TCA menurun dan terjadi akumulasi asam sitrat di dalam sel. Akumulasi asam sitrat yang berlebihan dapat merusak sel dan menurunkan produksi biomassa (Kuttiraja et al., 2016; Osorio-González et al., 2023).

Secara umum, glukosa merupakan sumber karbon ideal bagi pertumbuhan mikroorganisme karena kemudahan asimilasi dan efisiensi konversi menjadi lipid. Sebaliknya, xilosa sering kali kurang dimanfaatkan oleh khamir akibat represi katabolit (*carbon catabolic repression*), glukosa tinggi menekan ekspresi gen-gen yang terlibat dalam pemanfaatan sumber karbon lain (Carlson, 1999). Menariknya, *Rhodotorula taiwanensis* mampu mengakumulasi lipid hingga 50,1% pada hidrolisat lignoselulosa kaya xilosa, meski mekanisme asimilasinya belum terungkap (Miao et al., 2020). Sebaliknya, *Cryptococcus* sp. hanya menghasilkan $1,12 \text{ gL}^{-1}$ lipid pada substrat kaya fruktosa ($18,1 \text{ gL}^{-1}$), kemungkinan karena kehadiran inhibitor seperti furfural atau metabolisme fruktosa yang kurang optimal. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut dan memaksimalkan produksi SCO, dapat diterapkan strain khamir *oleaginous* seperti *Trichosporon fermentans* (Liu et al., 2015) dan *Lipomyces starkeyi* (Juanssilfero et al., 2018a) yang mampu mengasimilasi glukosa dan xilosa secara simultan. Selain itu, pendekatan rekayasa metabolik juga dapat dilakukan dengan introduksi gen NAD(P)H-dependent D-xylose reductase (XR) yang dapat meningkatkan produksi lipid hingga $12,8 \text{ gL}^{-1}$ seperti pada *Yarrowia lipolytica* pada substrat xilosa (De La Torre et al., 2025).

Pemanfaatan biomassa lignoselulosa sebagai sumber karbon memerlukan proses *pretreatment* dan hidrolisis untuk menguraikan struktur kompleks biomassa menjadi gula terfermentasi. Namun proses ini sering kali menghasilkan produk

sampingan berupa inhibitor, seperti asam asetat, furfural, HMF, vanilin, dan lainnya, yang dapat menghambat pertumbuhan khamir *oleaginous*, bergantung pada pada jenis dan konsentrasi inhibitor (Poontawee et al., 2017; Sharma et al., 2021). Furfural dilaporkan menyebabkan penghambatan pertumbuhan khamir dan produksi lipid dengan menurunkan aktivitas enzim *pyruvate dehydrogenase* (PDH), yang mengkatalisis konversi piruvat menjadi asetil-KoA. Penghambatan ini tidak hanya mengurangi pasokan asetil-KoA, tetapi juga mengganggu siklus TCA, sehingga terjadi defisit energi dan penurunan produksi lipid (Modig et al., 2002). Asam asetat menyebabkan kerusakan pada membran plasma khamir dan menghambat metabolisme sel melalui pengasaman sitoplasma, sehingga menyebabkan defisiensi ATP serta peningkatan aktivitas glikolisis (Sharma et al., 2021). Sementara itu, HMF menghambat pertumbuhan dan produksi lipid pada khamir meskipun tidak signifikan (Chen et al., 2009). Karena konsentrasi hambat minimum (*minimum inhibitory concentrations*) tiap strain khamir berbeda (Yu et al., 2025), penting untuk menerapkan metode *pretreatment* yang meminimalisir pembentukan inhibitor, dan diikuti dengan proses detoksifikasi untuk mengurangi bahkan menghilangkan inhibitor pada hidrolisat. Selain itu, seleksi strain toleran inhibitor seperti *Trichosporon fermentans* yang mampu mendetoksifikasi furfural melalui reduksi menjadi alkohol furfuril dan oksidasi menjadi asam furoat (Huang et al., 2012).

Selain konsentrasi gula, keseimbangan antara gula sebagai sumber karbon dan nitrogen yang tersedia dalam media sangat mempengaruhi akumulasi lipid. Pergeseran dari fase pertumbuhan ke akumulasi lipid terjadi ketika ketersediaan nitrogen menurun, dan kelebihan karbon diarahkan untuk akumulasi lipid (Lu et al., 2025). Oleh karena itu, rasio karbon-nitrogen (C/N) yang tinggi mendorong akumulasi lipid, karena kelebihan karbon akan diarahkan ke jalur biosintesis lipid. Substrat dengan rasio C/N yang tinggi, seperti biomassa lignoselulosa, merupakan substrat potensial dalam produksi lipid. Oleh karena itu, optimasi rasio C/N merupakan faktor penting untuk memaksimalkan produksi lipid dari khamir *oleaginous* yang memiliki karakteristik pertumbuhan yang berbeda-beda. Hal ini dikarenakan rasio C/N yang optimal berbeda untuk setiap spesies khamir dan jenis substrat yang digunakan (Cianchetta et al., 2022).

Lipid yang dihasilkan oleh khamir *oleaginous* dapat dikonversi menjadi biodiesel melalui proses *transmethylation* untuk menghasilkan *fatty acid methyl esters* (FAME). Semakin tinggi fraksi lipid yang dapat dikonversi, semakin besar pula potensi pemanfaatannya sebagai sumber biodiesel. Profil asam lemak dan sifat-sifat fisika kimia biodiesel, seperti densitas, titik nyala, angka setana, dan viskositas, juga merupakan penentu kelayakan lipid untuk digunakan sebagai biodiesel (Kumar Singh et al., 2024). Asam lemak dari SCO yang dihasilkan oleh *Rhodotorula glutinis* dan *Rhodotorula graminis* memiliki komposisi yang serupa dengan minyak nabati, terdiri atas asam oleat (C18:1), asam palmitat (C16:0), asam linoleat (C18:2), asam linolenat (C18:3), asam stearat (C18:0), asam miristat (C14:0), dan asam palmitoleat (C16:1) (Cianchetta et al., 2022). Selain itu, sebagian besar sifat biodiesel yang dihasilkan dari *Rhodotorula taiwanensis* memiliki karakteristik yang mendekati biodiesel berbasis minyak nabati (Miao et al., 2020). Temuan ini mengindikasikan bahwa lipid dari khamir *oleaginous* yang ditumbuhkan pada hidrolisat lignoselulosa berpotensi besar untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku biodiesel.

Dengan mengintegrasikan karakterisasi substrat, seleksi dan rekayasa strain, pengendalian inhibitor, serta optimalisasi kondisi kultur yang tepat, konversi biomassa lignoselulosa menjadi SCO untuk biodiesel generasi ketiga dapat ditingkatkan. Tahap selanjutnya dapat dilakukan dengan evaluasi dan optimalisasi metode *pretreatment* untuk meningkatkan gula terfermentasi dan meminimalisir pembentukan inhibitor.

Kesimpulan

Pemanfaatan biomassa lignoselulosa sebagai sumber karbon untuk khamir *oleaginous* tidak hanya mengurangi ketergantungan pada substrat konvensional dalam produksi biodiesel, tetapi juga mendukung pengelolaan limbah lignoselulosa secara berkelanjutan. Keberadaan inhibitor pada hidrolisat lignoselulosa yang dapat menghambat pertumbuhan dan produksi lipid khamir *oleaginous* menjadi tantangan dalam pemanfaatan biomassa lignoselulosa. Studi lebih lanjut dapat berfokus penerapan metode *pretreatment* yang meminimalisir terbentuknya inhibitor, serta pengembangan strain yang mampu menoleransi dan mendegradasi inhibitor melalui rekayasa metabolik dan adaptasi laboratorium. Selain itu, metode *pretreatment* yang tepat juga dapat meningkatkan konsentrasi gula pada hidrolisat lignoselulosa yang berdampak pada peningkatan produksi lipid oleh khamir *oleaginous*.

Daftar Pustaka

- Babatunde, E. O., Enomah, S., Akwenuke, O. M., Adepoju, T. F., Okwelum, C. O., Mundu, M. M., Aiki, A., & Oghenejabor, O. D. (2025). Novel-activated carbon from waste green coconut husks for the synthesis of biodiesel from pig fat oil blends with tallow seed oil. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11, 101058. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2024.101058>
- Carlson, M. (1999). Glucose repression in yeast. *Current Opinion in Microbiology*, 2(2), 202–207. [https://doi.org/10.1016/S1369-5274\(99\)80035-6](https://doi.org/10.1016/S1369-5274(99)80035-6)
- Chaabane, F. Ben, & Marchal, R. (2013). Upgrading the Hemicellulosic Fraction of Biomass into Biofuel. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies Nouvelles*, 68(4), 663–680. <https://doi.org/10.2516/ogst/2012093>
- Chen, X., Li, Z., Zhang, X., Hu, F., Ryu, D. D. Y., & Bao, J. (2009). Screening of Oleaginous Yeast Strains Tolerant to Lignocellulose Degradation Compounds. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 159(3), 591–604. <https://doi.org/10.1007/s12010-008-8491-x>
- Cherwoo, L., Gupta, I., Flora, G., Verma, R., Kapil, M., Arya, S. K., Ravindran, B., Khoo, K. S., Bhatia, S. K., Chang, S. W., Ngamcharussrivichai, C., & Ashokkumar, V. (2023). Biofuels an alternative to traditional fossil fuels: A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60, 103503. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103503>
- Chintagunta, A. D., Zuccaro, G., Kumar, M., Kumar, S. P. J., Garlapati, V. K., Postemsky, P. D., Kumar, N. S. S., Chandel, A. K., & Simal-Gandara, J. (2021). Biodiesel Production From Lignocellulosic Biomass Using Oleaginous Microbes: Prospects for Integrated Biofuel Production. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.658284>
- Cianchetta, S., Polidori, N., Vasmara, C., Ceotto, E., Marchetti, R., & Galletti, S. (2022). Single cell oil production from hydrolysates of alkali pre-treated giant reed: High biomass-to-lipid yields with selected yeasts. *Industrial Crops and Products*, 178, 114596. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114596>
- De La Torre, I., Acedos, M. G., Cestero, J. J., Barriuso, J., & García, J. L. (2025). Engineering Xylose Isomerase and Reductase Pathways in *Yarrowia lipolytica* for

- Efficient Lipid Production. *Microbial Biotechnology*, 18(3).
<https://doi.org/10.1111/1751-7915.70127>
- Guler, F., Leese, H. S., Castro-Dominguez, B., & Chuck, C. J. (2024). Converting perennial ryegrass into lipid using the oleaginous yeast *Metschnikowia pulcherrima*. *Industrial Crops and Products*, 222, 119990.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119990>
- Han, S., Kim, G.-Y., & Han, J.-I. (2019). Biodiesel production from oleaginous yeast, *Cryptococcus* sp. by using banana peel as carbon source. *Energy Reports*, 5, 1077–1081. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.07.012>
- Huang, C., Wu, H., Smith, T. J., Liu, Z., Lou, W.-Y., & Zong, M. (2012). In vivo detoxification of furfural during lipid production by the oleaginous yeast *Trichosporon fermentans*. *Biotechnology Letters*, 34(9), 1637–1642.
<https://doi.org/10.1007/s10529-012-0948-x>
- Juanssilfero, A. B., Kahar, P., Amza, R. L., Miyamoto, N., Otsuka, H., Matsumoto, H., Kihira, C., Thontowi, A., Yopi, Ogino, C., Prasetya, B., & Kondo, A. (2018a). Effect of inoculum size on single-cell oil production from glucose and xylose using oleaginous yeast *Lipomyces starkeyi*. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 125(6), 695–702. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2017.12.020>
- Juanssilfero, A. B., Kahar, P., Amza, R. L., Miyamoto, N., Otsuka, H., Matsumoto, H., Kihira, C., Thontowi, A., Yopi, Ogino, C., Prasetya, B., & Kondo, A. (2018b). Selection of oleaginous yeasts capable of high lipid accumulation during challenges from inhibitory chemical compounds. *Biochemical Engineering Journal*, 137, 182–191. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.05.024>
- Kamal, R., Huang, Q., Lu, H., Zhang, J., & Zhao, Z. K. (2024). Direct enzymatic hydrolysis of alkaline storage pretreated corn stover for lipid production by *Rhodospiridium toruloides*. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140325.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140325>
- Khalaf, M., Xuan, T., Abdel-Fadeel, W., Mustafa, H. M. M., Abdelhady, S., & Esmail, M. F. C. (2024). A comparative study of diesel engine fueled by *Jatropha* and *Castor* biodiesel: Performance, emissions, and sustainability assessment. *Process Safety and Environmental Protection*, 188, 453–466.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.05.137>
- Kumar, D., Singh, B., & Korstad, J. (2017). Utilization of lignocellulosic biomass by oleaginous yeast and bacteria for production of biodiesel and renewable diesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 654–671.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.022>
- Kumar Singh, N., Singh, Y., Kumar, V., & Singh, B. (2024). Biodiesel as a potential replacement fuel for CI engine to meet the sustainability criteria: A review. *Materials Today: Proceedings*, 102, 126–131.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.056>
- Kuttiraja, M., Douha, A., Valéro, J. R., & Tyagi, R. D. (2016). Elucidating the Effect of Glycerol Concentration and C/N Ratio on Lipid Production Using *Yarrowia*

- lipolytica SKY7. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 180(8), 1586–1600. <https://doi.org/10.1007/s12010-016-2189-2>
- Liu, Z., Liu, L., Wen, P., Li, N., Zong, M., & Wu, H. (2015). Effects of Acetic Acid and pH on the Growth and Lipid Accumulation of the Oleaginous Yeast *Trichosporon fermentans*. *BioResources*, 10(3). <https://doi.org/10.15376/biores.10.3.4152-4166>
- Lu, T., Liu, F., Jiang, C., Cao, J., Ma, X., & Su, E. (2025). Strategies for cultivation, enhancing lipid production, and recovery in oleaginous yeasts. *Bioresource Technology*, 416, 131770. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131770>
- Miao, Z., Tian, X., Liang, W., He, Y., & Wang, G. (2020). Bioconversion of corncob hydrolysate into microbial lipid by an oleaginous yeast *Rhodotorula taiwanensis* AM2352 for biodiesel production. *Renewable Energy*, 161, 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.007>
- Modig, T., Lide, N. G., & Taherzadeh, M. J. (2002). Inhibition effects of furfural on alcohol dehydrogenase, aldehyde dehydrogenase and pyruvate dehydrogenase. In *Biochem. J* (Vol. 363).
- Ngamsirisomsakul, M., Reungsang, A., & Kongkeithajorn, M. B. (2021). Assessing oleaginous yeasts for their potentials on microbial lipid production from sugarcane bagasse and the effects of physical changes on lipid production. *Bioresource Technology Reports*, 14, 100650. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100650>
- Osorio-González, C. S., Saini, R., Hegde, K., Brar, S. K., Lefebvre, A., & Avalos Ramirez, A. (2023). Carbon/nitrogen ratio as a tool to enhance the lipid production in *Rhodospiridium toruloides*-1588 using C5 and C6 wood hydrolysates. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135687. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135687>
- Patel, A., Sindhu, D. K., Arora, N., Singh, R. P., Pruthi, V., & Pruthi, P. A. (2015). Biodiesel production from non-edible lignocellulosic biomass of *Cassia fistula* L. fruit pulp using oleaginous yeast *Rhodospiridium kratochvilovae* HIMPA1. *Bioresource Technology*, 197, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.039>
- Poontawee, R., Yongmanitchai, W., & Limtong, S. (2017). Efficient oleaginous yeasts for lipid production from lignocellulosic sugars and effects of lignocellulose degradation compounds on growth and lipid production. *Process Biochemistry*, 53, 44–60. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.11.013>
- Ratledge, C. (2004). Fatty acid biosynthesis in microorganisms being used for Single Cell Oil production. *Biochimie*, 86, 807–815.
- Ratledge, C., & Wynn, J. P. (2002). The Biochemistry and Molecular Biology of Lipid Accumulation in Oleaginous Microorganisms. *Advances in Applied Microbiology*, 51, 1–51.
- Shaigani, P., Awad, D., Redai, V., Fuchs, M., Haack, M., Mehlmer, N., & Brueck, T. (2021). Oleaginous yeasts- substrate preference and lipid productivity: a view on the performance of microbial lipid producers. *Microbial Cell Factories*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-021-01710-3>

- Sharma, T., Sailwal, M., Dasgupta, D., Hazra, S., Bhaskar, T., & Ghosh, D. (2021). Effect of lignocellulosic biomass inhibitors on oleaginous yeast cultivation in multistage fermentation system. *Bioresource Technology Reports*, 15, 100791. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100791>
- Subramaniam, R., Dufreche, S., Zappi, M., & Bajpai, R. (2010). Microbial lipids from renewable resources: production and characterization. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 37(12), 1271–1287. <https://doi.org/10.1007/s10295-010-0884-5>
- Yu, J., Li, C., Cheng, Y., Guo, S., Lu, H., Xie, X., Ji, H., & Qiao, Y. (2025). Mechanism and improvement of yeast tolerance to biomass-derived inhibitors: A review. *Biotechnology Advances*, 81, 108562. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2025.108562>