



Potensi Lignoselulosa sebagai Bahan Baku Biomassa dalam Produksi Energi Terbarukan dengan Mikroorganisme Rumen

Thoriq^{1*}, Muhammad Alfajri Hikmattullah², Dhea Nurfadilla Chandra³

¹⁻²Institut Teknologi Bandung, Indonesia

³Universitas Negeri Padang, Indonesia

Article Info: Accepted: 7 November 2024; Approve: 25 November 2024; Published: 30 November 2024

Abstrak: Lignoselulosa merupakan suatu sumber daya terbarukan yang jumlahnya sangat melimpah dan transformasinya menjadi bioenergi berpotensi menjadi suatu sarana yang efektif untuk mengatasi kekurangan energi dan daur ulang limbah organik. Mikroorganisme rumen dapat mengalami reaksi hidrolisis, asidogenesis, dan metanogenesis terhadap biomassa lignoselulosa, terutama yang bergantung pada sinergi mikroorganisme dan enzim. Interaksi mikroorganisme yang berbeda mendorong efisiensi konversi lignoselulosa menjadi energi terbarukan dalam sistem pencernaan mikroorganisme rumen, terutama protozoa dan metanogen. Mikroorganisme rumen dapat mengeluarkan selulase, hemiselulase, dan ligninase, dengan reaksi tersendiri secara sinergis dapat mendorong degradasi lignoselulosa. Struktur substrat terhadap rumen dan sifat aditifnya dapat meningkatkan pencernaan rumen sebagai desain energi yang potensial terhadap biomassa lignoselulosa dalam produksi energi terbarukan. Berbagai produk bernilai tinggi seperti etanol, VFA, MCFA, biogas, dan pupuk organik dapat dihasilkan melalui mikroorganisme rumen terhadap biomassa lignoselulosa, tergantung pada substrat fermentasi bakteri rumen tersebut.

Kata Kunci: Lignoselulosa; Mikroorganisme Rumen; Biomassa; Energi Terbarukan.

Abstract: *Lignocellulose is a renewable and bountiful resource that its transformation into bioenergy holds the potential to be an effective tool that could solve energy shortage and organic waste treatment. Rumen microorganisms are capable of performing hydrolysis, acidogenesis, and methanogenesis reactions on lignocellulosic biomass, particularly those that rely on microbial and enzymatic synergy. The different interactions between microorganisms promote efficiency of lignocellulose conversion to renewable energy in the rumen microorganisms' digestive system, particularly the protozoa and methanogens. Rumen Microorganisms can produce cellulase, hemicellulase, and ligninase, with their own reaction synergistically can boost the lignocellulose degradation. The substrate structure and its additive properties can improve rumen digestion as a potential energy design that has its potential on lignocellulosic biomass in renewable energy production. Various high-value products like ethanol, VFA, MCFA, biogas, and organic fertilizer can be synthesized by rumen microorganisms acting on lignocellulosic biomass, depending on the fermentation substrate of the rumen bacteria.*

Keywords: *Lignocellulose; Rumen Microorganism; Biomass; Renewable Energy.*

Correspondence Author: Thoriq

Email: tbrothers150@gmail.com

This is an open access article under the [CC BY SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



Pendahuluan

Kebutuhan energi dunia meningkat dengan semakin bertambahnya populasi dunia. Diprediksikan bahwa pada tahun 2050, konsumsi energi akan meningkat sebanyak 28% dari tahun 2021 (IEA, 2021). Selain itu, cadangan energi dalam bentuk bahan bakar fosil semakin berkurang tiap waktunya. Untuk menjawab peningkatan kebutuhan energi di masa depan dengan

semakin berkurangnya pasokan energi, dibutuhkan alternatif sumber energi yang dapat menjawab dua persoalan tersebut.

Krisis energi global dan perubahan iklim mendorong perkembangan energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan. Salah satu sumber energi terbarukan yang potensial adalah biomassa lignoselulosa, yang melimpah dan tersedia dari limbah pertanian, kehutanan, serta industri pangan. Lignoselulosa, sebagai komponen utama dari bahan baku biomassa, terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin, yang kesemuanya mengandung rantai karbon yang dapat diubah menjadi energi melalui proses biokonversi. Lignoselulosa merupakan senyawa bahan alam yang banyak dihasilkan sebagai limbah industri. Setiap tahunnya sekitar 200 miliar ton biomassa tersebut dihasilkan (Nguyen et al., 2019). Tingginya angka produksi senyawa ini membutuhkan penanganan yang khusus. Sebagian besar lignoselulosa yang dihasilkan terbuang percuma, bahkan menimbulkan pencemaran udara akibat penanganan yang salah dengan cara pembakaran (Sawatdeenarunat et al., 2015). Salah satu pemanfaatan biomassa ini adalah sebagai sumber energi yang terbarukan dan ramah lingkungan dengan proses konversi secara biologis.

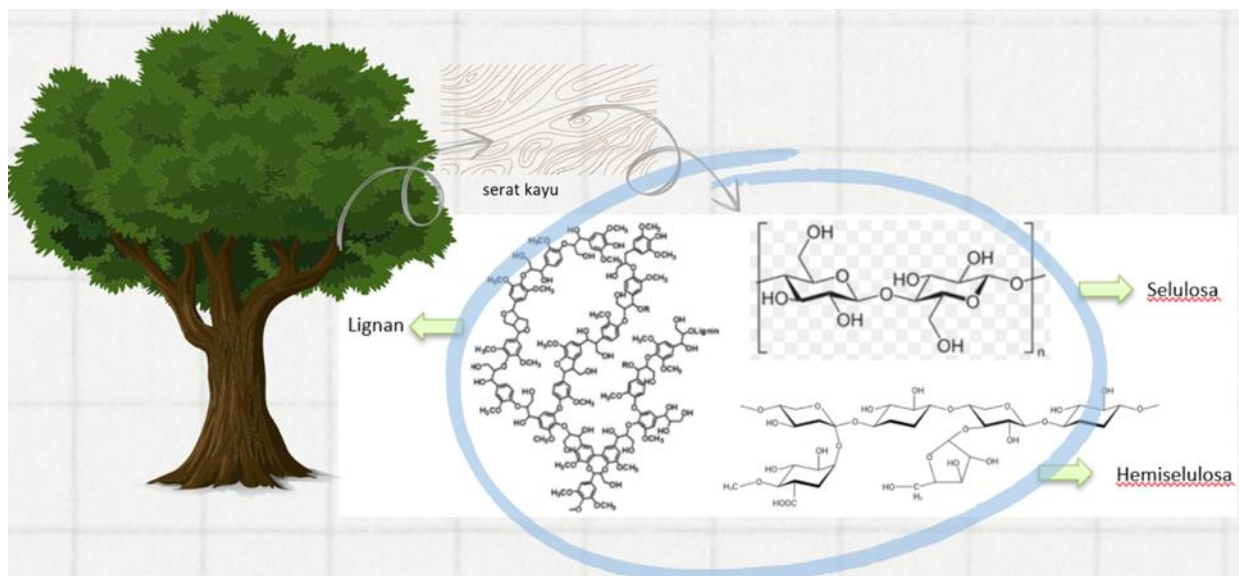
Mikroorganisme rumen, yang secara alami ditemukan dalam sistem pencernaan hewan pemamah biak, menawarkan solusi menarik untuk tantangan ini. Mikroorganisme ini memiliki kemampuan unik untuk menghidrolisis dan memfermentasi lignoselulosa menjadi senyawa energi yang dapat digunakan, seperti metana, hidrogen, dan asam organik. Mengingat efisiensi mereka dalam memecah struktur lignoselulosa, penelitian tentang pemanfaatan mikroorganisme rumen semakin berkembang sebagai pendekatan bioenergi yang berpotensi tinggi (Theodorou & France, 2005).

Studi ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi lignoselulosa sebagai bahan baku energi terbarukan dengan melibatkan mikroorganisme rumen sebagai agen biokonversi. Pada artikel ini akan dibahas karakteristik lignoselulosa, mekanisme biodegradasi oleh mikroorganisme rumen, serta potensi aplikasi teknologi ini dalam produksi energi terbarukan. Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat ditemukan metode yang lebih berkelanjutan dalam menghasilkan energi dari sumber daya alam yang melimpah namun kurang termanfaatkan.

Kajian Teori

lignoselulosa merupakan campuran senyawa kimia yang ditemukan dalam dinding sel tumbuhan, terutama serat kayu dan tanaman berbiji. Lignoselulosa terdiri dari terdiri dari tiga polimer utama yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Selulosa merupakan polisakarida yang terdiri dari molekul glukosa yang saling terikat dengan ikatan β -1,4-glikosidik, berperan sebagai bahan dasar penyusun dinding sel tumbuhan dan merupakan salah satu polimer organik paling melimpah di dunia. Sedangkan lignin merupakan senyawa polimerik kompleks yang sangat kuat,

memberikan dukungan struktural pada tanaman, dan memberikan sifat anti-air dan anti-mikroba pada kayu dan serat tanaman lainnya. Monomer penyusun lignin terdiri dari berbagai senyawa aromatik seperti p-hidroksifenil, guaiasil, dan syringil (Bajpai et al., 2016). Kombinasi lignin dan lignoselulosa memberikan kekuatan dalam struktur sel tumbuhan. Gambar 1 merupakan ilustrasi sumber lignoselulosa serta senyawa penyusunnya. Lignoselulosa dapat digunakan sebagai bahan dasar untuk produksi pulp dan kertas, serta berbagai bahan baku dalam industri bioenergi dan biomaterial. Lignoselulosa adalah salah satu biomassa yang paling melimpah di alam (Hendriks et al., 2009). Struktur lignoselulosa yang kompleks memberikan tantangan dalam pemanfaatannya, tetapi juga berpotensi untuk berbagai aplikasi bioenergi, terutama dalam produksi biofuel seperti bioetanol, biodiesel, dan biogasikroorganisme Rumen sebagai Agen Biokonversi.



Gambar 1. Gambaran Umum Lignoselulosa

Mikroorganisme rumen merupakan sekelompok mikroorganisme yang hidup dalam rongga perut hewan ruminansia seperti sapi, domba, dan kambing. Mikroorganisme rumen terdiri dari berbagai jenis. Mikroorganisme dalam rumen (sistem pencernaan hewan pemamah biak) memiliki enzim khusus yang dapat mendekomposisi lignoselulosa menjadi komponen yang lebih sederhana. Enzim yang diproduksi oleh bakteri, fungi, dan protozoa dalam rumen mampu menghidrolisis selulosa dan hemicelulosa secara efisien, menghasilkan produk yang dapat dimanfaatkan untuk produksi energi terbarukan (Loh et al, 2020). Mikroorganisme rumen juga dapat memproduksi berbagai jenis enzim, asam lemak, vitamin, dan asam amino yang berperan dalam metabolisme hewan. Dalam konteks pangan, mikroorganisme rumen digunakan dalam proses fermentasi untuk menghasilkan berbagai produksi pangan seperti keju, yoghurt, dan tempe (Nagaraja, 2016).

Mikroorganisme tersebut bekerja sama dalam mencerna serat dan bahan pangan yang sulit dicerna oleh hewan melalui fermentasi. Fungi dan protozoa lebih berperan dalam menguraikan dan mencerna selulosa. Mikroorganisme rumen yang berada dalam kesetimbangan dinamis berperan penting dalam degradasi biomassa lignoselulosa. Berbagai mikroorganisme yang termasuk ke golongan mikroorganisme rumen dapat mengeluarkan enzim pencernaan seperti selulase, hemiselulase, dan ligninase. Dengan enzim tersebut mikroorganisme rumen dapat mengubah selulosa, hemiselulosa, dan lignin, menjadi monosakarida, yang selanjutnya dapat diubah menjadi asam lemak volatil, metana, dan produk lainnya (Hua et al., 2022). Degradasi biomassa lignoselulosa dalam rumen diperkirakan tiga kali lebih efektif dibandingkan dengan digester anaerob tradisional. Cairan rumen telah berhasil digunakan sebagai agen biologis untuk mengolah biomassa lignoselulosa untuk menghasilkan VFA dan biogas.

Proses utama dalam pemanfaatan lignoselulosa adalah hidrolisis enzimatis yang diikuti fermentasi. Hidrolisis mengubah polimer lignoselulosa menjadi gula sederhana, sedangkan fermentasi mengubah gula ini menjadi biogas atau bioetanol. Mikroorganisme rumen diketahui memiliki kemampuan unik untuk mengoptimalkan kedua proses ini, sehingga berpotensi besar untuk meningkatkan efisiensi produksi energi dari biomassa lignoselulosa. Beberapa tantangan yang dihadapi dalam proses ini mencakup efisiensi enzimatis yang rendah karena lignin yang tahan terhadap degradasi, serta kesulitan dalam mempertahankan kondisi fermentasi yang optimal. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa rekayasa genetik pada mikroorganisme rumen atau penggunaan kultur campuran dapat meningkatkan efektivitas konversi lignoselulosa menjadi energi yang lebih efisien dan ramah lingkungan (Zoghlami et al., 2019).

Metode

Artikel ini disusun sebagai kajian literatur sistematis dengan pendekatan komprehensif terhadap penelitian yang membahas potensi lignoselulosa sebagai bahan baku biomassa untuk produksi energi terbarukan melalui pemanfaatan mikroorganisme rumen. Pengumpulan data dilakukan dengan pencarian literatur secara ekstensif pada basis data ilmiah utama, termasuk ScienceDirect, PubMed, SpringerLink, dan Google Scholar, menggunakan kata kunci spesifik seperti "lignoselulosa," "biomassa," "energi terbarukan," "mikroorganisme rumen," dan "biokonversi lignoselulosa." Artikel yang dipilih untuk kajian ini adalah penelitian asli, artikel review, dan makalah konferensi yang kredibel dan bereputasi.

Literatur yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan relevansi topik, yang diidentifikasi melalui telaah judul dan abstrak. Artikel yang lolos seleksi awal diperiksa secara menyeluruh, dan data yang diperoleh dikelompokkan ke dalam beberapa kategori relevan dengan pembahasan yang diperlukan. Data kualitatif dari literatur terpilih dianalisis secara mendalam

guna menyusun gambaran komprehensif tentang mekanisme dan efisiensi biokonversi lignoselulosa oleh mikroorganisme rumen. Beberapa parameter kunci yang dianalisis seperti komposisi lignoselulosa, aktivitas enzim mikroorganisme rumen, hasil bioproduk yang dihasilkan, serta tantangan dan peluang dalam aplikasi proses ini pada skala industri.

Berdasarkan hasil analisis, artikel ini menyajikan rangkuman pengetahuan terkini terkait penggunaan lignoselulosa sebagai biomassa untuk energi terbarukan melalui biokonversi mikroorganisme rumen. Data yang diperoleh diinterpretasikan untuk memberikan pandangan mendalam tentang kelebihan, keterbatasan, dan inovasi yang diperlukan untuk disajikan dalam bentuk data yang utuh terkait potensi dari lignoselulosa dalam produksi energi terbarukan dengan bantuan mikroorganisme rumen.

Hasil Dan Pembahasan

1. Hasil

a. Komposisi Mikroorganisme Rumen

Populasi mikroorganisme dalam rumen ruminansia menunjukkan interaksi khusus yang mendukung degradasi lignoselulosa secara efektif. Populasi ini sangat kompleks, terdiri dari berbagai jenis mikroorganisme utama, yaitu bakteri, protozoa, jamur, dan bakteri archaea. Setiap jenis mikroorganisme memiliki peran spesifik dalam mendukung proses fermentasi dan degradasi biomassa, yang menjadi inti dari fungsi rumen sebagai ekosistem unik (Lan et al., 2019).

Bakteri rumen, sebagai mikroorganisme prokariotik, memainkan peran dominan dalam proses fermentasi makanan, terutama pakan berserat tinggi seperti rumput dan jerami. Dengan kemampuan enzimatik yang tinggi, bakteri ini mendegradasi selulosa dan hemiselulosa menjadi senyawa sederhana yang dapat diserap oleh hewan. Selain itu, setiap spesies bakteri rumen menunjukkan spesifisitas terhadap substrat tertentu, menghasilkan produk degradasi yang berbeda. Misalnya, *Ruminococcus albus* mendegradasi selulosa dan xilan menjadi asam asetat, etanol, formate, hidrogen, dan karbon dioksida, sedangkan *Butyrivibrio fibrisolvens* menghasilkan asam butirat dari selulosa dan xilan (Suen et al., 2015; Teather & Ohmiya, 1991). Peran bakteri ini menjadi pusat efisiensi degradasi lignoselulosa karena laju pertumbuhan dan aktivitas metaboliknya yang tinggi.

Protozoa rumen, yang terdiri dari ciliata dan flagellata, juga berperan penting dalam proses degradasi lignoselulosa. Mikroorganisme ini memanfaatkan pati, selulosa, dan hemiselulosa melalui glikolisis, sekaligus menghidrolisis protein untuk menghasilkan amonia. Amonia yang dihasilkan penting untuk mendukung sintesis protein oleh bakteri rumen, sehingga memperkuat ekosistem fermentasi di rumen. Proses ini menciptakan sinergi yang mendukung efisiensi degradasi lignoselulosa secara keseluruhan (Wright, 2015).

Jamur rumen, meskipun kurang dominan dibandingkan bakteri, memiliki kemampuan degradasi lignoselulosa yang sangat efisien. Enam genera utama, termasuk *Neocallimastix* dan *Cyllumyces*, dikenal memiliki aktivitas degradasi yang tinggi. Jamur ini menghasilkan enzim yang secara langsung berikatan dengan dinding sel tumbuhan dan menghasilkan produk metabolisme seperti gas hidrogen dan karbon dioksida. Produk ini kemudian dimanfaatkan oleh bakteri pengguna hidrogen untuk mendukung proses degradasi lebih lanjut, memperkuat efisiensi ekosistem rumen (Fliegerove et al., 2015).

Archaea rumen, terutama archaea metanogenik, meskipun populasinya kecil, memiliki kontribusi signifikan dalam mendukung keseimbangan ekosistem rumen. Archaea ini mengonsumsi gas hidrogen yang dihasilkan oleh aktivitas jamur rumen dan mengubahnya menjadi gas metana. Gas metana dapat dimanfaatkan lebih lanjut sebagai sumber energi dalam bentuk biogas. Dengan demikian, archaea memainkan peran penting dalam mendukung aktivitas mikroorganisme lain di rumen dan menciptakan ekosistem yang lebih stabil (Attwood et al., 2020).

Keterkaitan antara bakteri, protozoa, jamur, dan archaea dalam rumen membentuk ekosistem yang saling melengkapi. Setiap kelompok mikroorganisme berkontribusi terhadap efisiensi degradasi lignoselulosa, menciptakan sinergi yang mendukung proses fermentasi dan meningkatkan ketersediaan energi bagi hewan ruminansia.

b. Mekanisme mikroorganisme rumen dalam degradasi biomassa lignoselulosa

Variasi dan interaksi kompleks mikroorganisme rumen dalam proses degradasi lignoselulosa berlangsung melalui beberapa jalur reaksi yang berbeda. Bakteri rumen memiliki kemampuan untuk memotong permukaan dan dinding sel tumbuhan melalui mekanisme adhesi dan interaksi kimiawi, yang memungkinkan lignoselulosa terhidrolisis menjadi senyawa yang lebih mudah dicerna oleh hewan ruminansia. Jamur rumen, di sisi lain, dapat menguraikan lignoselulosa menjadi fragmen yang lebih sederhana dengan cara menembus matriks sel tumbuhan menggunakan zoospora yang dihasilkan dari sporangium dan mengeluarkan struktur seperti flagel. Sementara itu, protozoa rumen mampu langsung mengonsumsi lignoselulosa dan mengonversinya menjadi polisakarida.

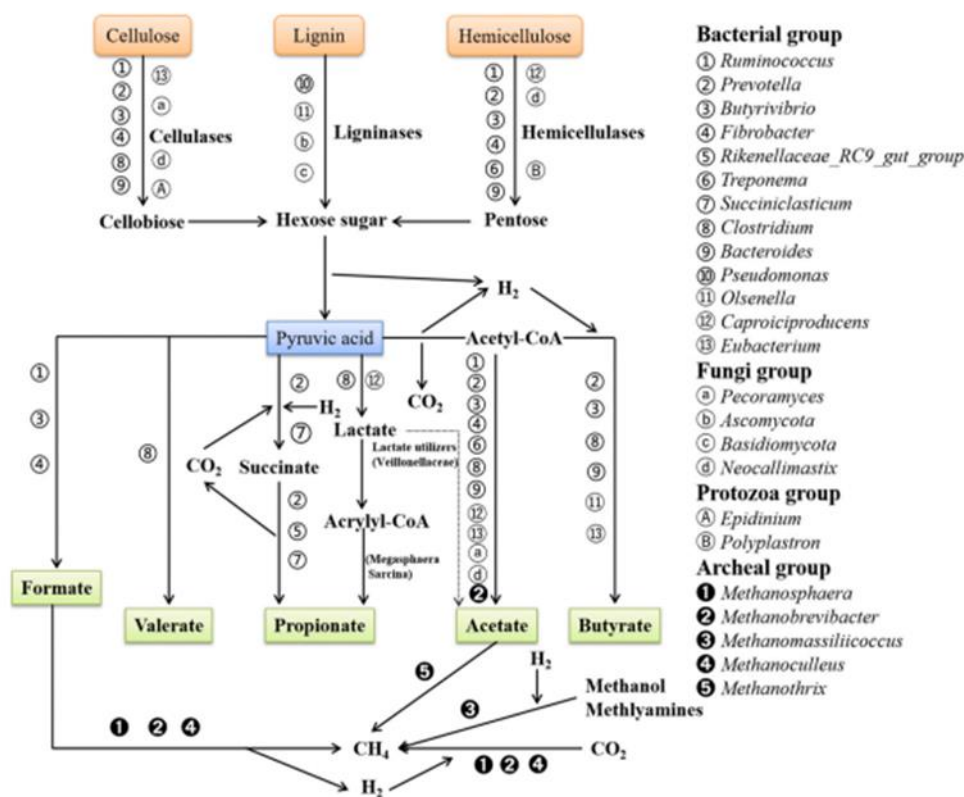
c. Penerapan mikroorganisme rumen dalam degradasi biomassa lignoselulosa

Mikroorganisme rumen memiliki potensi besar dalam proses degradasi biomassa lignoselulosa yang mencakup dedak jagung, kertas bekas, dan limbah sayuran. Proses ini menghasilkan produk utama berupa asam lemak volatil (VFA) dan biogas, yang menjadi solusi dalam pengelolaan limbah serta pengembangan energi terbarukan. Mikroorganisme rumen, yang terdiri dari bakteri, protozoa, dan jamur, memiliki kemampuan enzimatik untuk memecah

komponen liginoselulosa menjadi senyawa sederhana, seperti glukosa. Struktur kompleks biomassa liginoselulosa yang terdiri dari lignin, selulosa, dan hemiselulosa memerlukan proses khusus, sehingga mikroorganisme rumen menjadi alternatif yang efisien untuk meningkatkan konversi biomassa tersebut (Xing et al., 2020).

Kemampuan unik mikroorganisme rumen dalam mendegradasi biomassa liginoselulosa dihasilkan oleh aktivitas enzimatik dari spesies seperti *Fibrobacter succinogenes* dan *Ruminococcus albus* yang memecah selulosa, sementara bakteri seperti *Bacteroides* dan *Methanogens* membantu dalam pemecahan lignin serta produksi VFA. Asam lemak volatil seperti asetat, propionat, dan butirrat yang dihasilkan dari proses ini tidak hanya menjadi sumber energi penting bagi ruminansia, tetapi juga memberikan manfaat lingkungan melalui pengurangan emisi gas rumah kaca seperti metana. Selain itu, produk tambahan dari fermentasi liginoselulosa ini dapat digunakan dalam berbagai industri bioenergi dan bioplastik (Wang et al., 2020).

Proses produksi VFA dimulai dari hidrolisis liginoselulosa menjadi heksosa yang dipicu oleh enzim, dilanjutkan dengan konversi menjadi asam piruvat. Selanjutnya, asam piruvat terurai menjadi H_2 , CO_2 , dan VFA melalui jalur metabolisme yang kompleks, yaitu seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2. Jalur metabolisme pencernaan liginoselulosa oleh mikroorganisme rumen dominan (bakteri, jamur, protozoa, dan kelompok archeal). (Xing BS, 2020)

Pada gambar 2 di atas, ditunjukkan jalur metabolisme lignoselulosa oleh mikroorganisme rumen, yang melibatkan transformasi enzimatik komponen utama lignoselulosa menjadi produk akhir seperti asetat, butirat, dan propionat. Dalam proses ini, interaksi sinergis antar mikroba memainkan peran penting, di mana produk metabolisme satu mikroba menjadi substrat bagi mikroba lainnya. Mikroorganisme seperti *Ruminococcus*, *Prevotella*, dan *Fibrobacter* mendominasi fermentasi awal, sementara kelompok archaea seperti *Methanobrevibacter* berperan dalam pembentukan metana melalui reduksi CO₂ dengan H₂, menjaga keseimbangan hidrogen dalam sistem (Xing et al., 2020).

Selain menghasilkan VFA, mikroorganisme rumen juga berkontribusi dalam produksi biogas melalui fermentasi anaerob biomassa lignoselulosa. Proses ini menghasilkan metana dan karbon dioksida sebagai komponen utama biogas, yang dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan mikroorganisme rumen dalam reaktor anaerob dapat meningkatkan hasil biogas secara signifikan, misalnya pada perlakuan limbah kertas dan eceng gondok kering. Namun, aplikasi komersial teknologi ini masih terbatas, sehingga penelitian lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan efisiensi dan skalabilitas sistem produksi biogas berbasis mikroorganisme rumen (Zheng et al., 2019).

Penggunaan reaktor anaerob dalam konversi biomassa lignoselulosa berbasis mikroorganisme rumen menjadi penting untuk mendukung pengembangan energi terbarukan. Reaktor ini dirancang untuk mengoptimalkan aktivitas mikroorganisme dengan mengatur faktor operasional seperti suhu, pH, dan waktu tinggal. Penelitian menunjukkan bahwa lingkungan anaerob dalam reaktor meningkatkan efisiensi degradasi lignoselulosa hingga 45% pada jerami gandum. Meskipun demikian, tantangan teknis seperti kontrol parameter sistem masih perlu diatasi. Desain reaktor anaerob yang lebih efisien dapat mendukung produksi energi terbarukan dari biomassa lignoselulosa, sekaligus memberikan solusi terhadap pengelolaan limbah yang ramah lingkungan (Jin et al., 2018; Sawatdeenarunat et al., 2015).

d. Strategi pencernaan rumen pada ruminansia untuk peningkatan degradasi lignoselulosa

Studi mengenai aplikasi mikroorganisme rumen dalam rekayasa lingkungan masih tergolong terbatas. Namun, beberapa penelitian telah mengkaji modulasi mikroorganisme rumen dan sistem pencernaan untuk mengoptimalkan fungsi rumen. Strategi ini mencakup manipulasi rumen melalui pengaturan struktur pakan dan penggunaan aditif pakan sebagai upaya meningkatkan efisiensi pencernaan dan memaksimalkan hasil fermentasi.

Struktur pakan memiliki pengaruh signifikan terhadap pencernaan rumen, termasuk komposisi mikroorganisme, produksi asam lemak volatil (VFA), dan biogas. Perubahan pola makan ternak memengaruhi produksi metana (CH₄), yang merupakan salah satu komponen

biogas. Tingginya proporsi konsentrat dalam pakan meningkatkan produksi biogas meskipun menghasilkan kadar CH₄ yang lebih rendah, sementara konsentrasi propionat dan butirrat tercatat lebih tinggi pada proporsi konsentrat yang tinggi atau sedang. Struktur pakan juga memengaruhi populasi mikroba rumen dan proses fermentasi. Penelitian secara *in vitro* menggunakan cairan rumen menunjukkan bahwa pencampuran substrat beragam dapat menghasilkan VFA dan biogas dengan efisiensi lebih baik. Xin et al. (2020) mengajukan strategi co-substrat dengan menambahkan limbah makanan ke dalam jerami gandum dan jagung untuk meningkatkan degradasi lignoselulosa, memperbaiki produksi VFA, serta mengoptimalkan struktur komunitas bakteri ruminal, jamur, dan metanogen.

Selain struktur pakan, penggunaan aditif pakan juga terbukti memberikan dampak positif yang signifikan terhadap pencernaan rumen. Aditif pakan berperan dalam mengubah ekologi mikroba rumen, yang pada gilirannya dapat memanipulasi keseimbangan energi serta meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi. Strategi ini juga bertujuan untuk mengurangi emisi metana (CH₄), yang tidak hanya berkontribusi pada efisiensi pencernaan, tetapi juga memiliki implikasi positif terhadap pengelolaan lingkungan (Michalak et al., 2021). Efek aditif pakan mencakup peningkatan aktivitas mikroorganisme rumen, seperti bakteri yang membantu proses fermentasi. Sun et al. (2021) melaporkan bahwa penggunaan enzim dapat meningkatkan ketersediaan nutrisi dengan memecah komponen pakan yang kompleks, sementara probiotik dan prebiotik merangsang pertumbuhan bakteri yang menguntungkan.

Aditif pakan juga membantu menyeimbangkan pH rumen untuk menjaga kesehatan mikroba dan mencegah masalah pencernaan seperti asidosis. Bahan alami seperti minyak atsiri dan saponin memiliki efek antimikroba yang mampu mengontrol bakteri patogen dalam rumen. Selain itu, peningkatan produksi VFA yang dihasilkan dari penggunaan aditif pakan menjadi sumber energi utama bagi ruminansia. Hal ini meningkatkan efisiensi konversi pakan menjadi produk hewani seperti daging dan susu. Penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa aditif seperti senyawa tumbuhan sekunder, ionofor, dan asam organik juga berkontribusi terhadap pengurangan emisi metana sambil meningkatkan metabolisme nitrogen dan fermentasi yang mengarah pada produksi propionat (Wood et al., 2009). Temuan ini menegaskan bahwa kombinasi struktur pakan yang tepat dan penggunaan aditif pakan dapat mengoptimalkan degradasi lignoselulosa serta efisiensi konversi nutrisi menjadi energi.

2. Pembahasan

Populasi mikroorganisme rumen pada ruminansia merupakan ekosistem kompleks yang memainkan peran penting dalam degradasi lignoselulosa, yang terdiri dari bakteri, protozoa, jamur, dan archaea. Setiap kelompok mikroorganisme ini memiliki peran spesifik yang saling

melengkapi. Bakteri rumen, misalnya, berfungsi sebagai pemain utama dalam fermentasi bahan berserat tinggi seperti jerami dan rumput, dengan enzim-enzim yang mampu mendegradasi selulosa dan hemiselulosa menjadi senyawa sederhana seperti asam asetat dan butirir. Penelitian Lan et al. (2019) menunjukkan bahwa spesifisitas bakteri seperti *Ruminococcus albus* terhadap substrat tertentu memungkinkan proses degradasi yang efisien. Peran dominan bakteri ini diperkuat oleh aktivitas metabolisme protozoa yang menghasilkan amonia untuk mendukung sintesis protein oleh bakteri, menciptakan sinergi fermentasi yang berkelanjutan.

Selain bakteri dan protozoa, jamur rumen juga memiliki kontribusi signifikan, terutama melalui kemampuannya dalam menembus matriks lignoselulosa dengan struktur flagelnya. Enzim yang dihasilkan jamur ini mendukung penguraian lignoselulosa menjadi fragmen yang lebih sederhana, yang kemudian dimanfaatkan oleh mikroorganisme lain. Fliegerova et al. (2015) mengidentifikasi genus *Neocallimastix* dan *Cyllumyces* sebagai contoh utama jamur yang berperan dalam proses ini. Selain itu, archaea rumen, meskipun populasinya lebih kecil, bertindak sebagai penyeimbang hidrogen melalui konversi gas hidrogen menjadi metana. Temuan Attwood et al. (2020) menegaskan bahwa peran archaea ini penting dalam menjaga kestabilan ekosistem fermentasi di rumen.

Interaksi sinergis antara mikroorganisme rumen tersebut menjadi dasar mekanisme degradasi lignoselulosa yang kompleks. Melalui mekanisme adhesi dan pemecahan kimiawi oleh bakteri, serta penetrasi struktur lignoselulosa oleh jamur, biomassa lignoselulosa dapat diubah menjadi senyawa yang lebih mudah dicerna. Penelitian Suen et al. (2015) menunjukkan bahwa bakteri seperti *Fibrobacter succinogenes* mampu menghidrolisis selulosa dengan efisiensi tinggi, sementara protozoa berkontribusi pada pengolahan polisakarida. Hasil degradasi ini tidak hanya bermanfaat bagi ruminansia, tetapi juga menjadi dasar bagi aplikasi teknologi seperti produksi asam lemak volatil (VFA) dan biogas.

Potensi mikroorganisme rumen dalam penerapan industri semakin menarik perhatian, terutama dalam pengelolaan limbah biomassa. Xing et al. (2020) mengidentifikasi bahwa penggunaan mikroorganisme rumen dapat meningkatkan konversi limbah seperti dedak jagung dan kertas bekas menjadi VFA dan biogas. Jalur metabolisme lignoselulosa yang melibatkan enzim-enzim rumen memungkinkan produksi energi terbarukan dengan efisiensi tinggi. Misalnya, reaktor anaerob berbasis mikroorganisme rumen dapat mengoptimalkan hasil biogas hingga 45% pada jerami gandum, sebagaimana dilaporkan oleh Sawatdeenarunat et al. (2015). Namun, tantangan dalam desain dan kontrol reaktor masih memerlukan penelitian lebih lanjut untuk mencapai efisiensi maksimal.

Strategi optimasi fungsi rumen juga mencakup manipulasi struktur pakan dan penggunaan aditif. Struktur pakan berpengaruh pada populasi mikroorganisme, komposisi VFA, dan produksi

metana. Xin et al. (2020) mengusulkan strategi co-substrat untuk meningkatkan efisiensi fermentasi dan memperbaiki komunitas mikroorganisme rumen. Di sisi lain, aditif pakan seperti enzim, probiotik, dan senyawa tumbuhan sekunder mampu meningkatkan aktivitas mikroorganisme dan mengurangi emisi metana. Michalak et al. (2021) menunjukkan bahwa aditif ini tidak hanya meningkatkan efisiensi pencernaan, tetapi juga memberikan manfaat lingkungan. Kombinasi antara struktur pakan yang tepat dan penggunaan aditif ini menjadi solusi potensial dalam optimasi degradasi lignoselulosa dan pengelolaan limbah.

Secara keseluruhan, ekosistem rumen dengan kompleksitas interaksinya memberikan peluang besar untuk mendukung efisiensi pencernaan ruminansia sekaligus menawarkan solusi inovatif dalam pengelolaan limbah dan pengembangan energi terbarukan. Dengan penelitian lebih lanjut dan pengembangan teknologi yang berkelanjutan, mikroorganisme rumen dapat dimanfaatkan secara optimal dalam berbagai aplikasi industri yang ramah lingkungan.

Kesimpulan

Biomassa lignoselulosa memiliki potensi yang sangat besar untuk dikonversikan menjadi sumber energi terbarukan dengan mikroorganisme rumen yang bisa diisolasi dari hewan ruminansia. Interaksi dan variasi jenis mikroorganisme mengakibatkan degradasi lignoselulosa memiliki banyak jalur reaksi. Degradasi lignoselulosa tersebut dapat diimplementasikan pada produksi VFA, biogas, dan reaktor anaerob. Proses degradasi lignoselulosa menggunakan mikroorganisme rumen dapat dioptimasi dengan pemberian pakan tertentu pada hewan ruminansia asal mikroorganisme.

Referensi

- Attwood, G. T., Leahy, S. C., & Kelly, W. J. (2020). The rumen archaea. In *Improving Rumen Function* (pp. 133-190). Burleigh Dodds Science Publishing.
- Baba Y, Tada C, Fukuda Y, Nakai Y. Improvement of methane production from waste paper by pretreatment with rumen fluid. *Bioresour Technol* 2013;128:94–9.
- Bajpai, P., & Bajpai, P. (2016). Structure of lignocellulosic biomass. *Pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuel production*, 7-12.
- Fliegerova, K., Kaerger, K., Kirk, P., & Voigt, K. (2015). Rumen fungi. *Rumen microbiology: from evolution to revolution*, 97-112.
- Hendriks, A. T. W. M., & Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*, 100(1), 10-18.
- Hua, D., Hendriks, W. H., Xiong, B., & Pellikaan, W. F. (2022). Starch and cellulose degradation in the rumen and applications of metagenomics on ruminal microorganisms. *Animals*, 12(21), 3020.

- IEA. (2021). World Energy Outlook 2021, IEA, Paris. Diakses pada 03 November 2024. <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>>
- Jin, W., Xu, X., & Yang, F. (2018). Application of rumen microorganisms for enhancing biogas production of corn straw and livestock manure in a pilot-scale anaerobic digestion system: performance and microbial community analysis. *Energies*, 11(4), 920.
- Jungersen, M., Wind, A., Johansen, E., Christensen, J. E., Stuer-Lauridsen, B., & Eskesen, D. (2014). The Science behind the Probiotic Strain *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* BB-12(®). *Microorganisms*, 2(2), 92–110.
- Lan, W., & Yang, C. (2019). Ruminant methane production: Associated microorganisms and the potential of applying hydrogen-utilizing bacteria for mitigation. *Science of the Total Environment*, 654, 1270-1283.
- Latham, M. J., & Wolin, M. J. (1977). Fermentation of cellulose by *Ruminococcus flavefaciens* in the presence and absence of *Methanobacterium ruminantium*. *Applied and environmental microbiology*, 34(3), 297–301.
- Loh, Z. H., Ouwerkerk, D., Klieve, A. V., Hungerford, N. L., & Fletcher, M. T. (2020). Toxin degradation by rumen microorganisms: a review. *Toxins*, 12(10), 664.
- McCann JC, Elolimy AA, Loor JJ. Rumen microbiome, probiotics, and fermentation additives. *Vet Clin Food Anim* 2017;33:539–53.
- McGavin, M., & Forsberg, C. W. (1989). Catalytic and substrate-binding domains of endoglucanase 2 from *Bacteroides succinogenes*. *Journal of bacteriology*, 171(6), 3310–3315.
- Michalak, M., Wojnarowski, K., Cholewińska, P., Szeligowska, N., Bawej, M., & Pacoń, J. (2021). Selected alternative feed additives used to manipulate the rumen microbiome. *Animals*, 11(6), 1542.
- Nagaraja, T. G. (2016). Microbiology of the rumen. *Rumenology*, 39-61.
- Nguyen, L. N., et al. (2019). Application of Rumen and Anaerobic Sludge Microbes for Bio Harvesting from Lignocellulosic Biomass. *Chemosphere*, 228, 702-708.
- Ogunade IM, Lay J, Andries K, Bebe F. Effects of a live yeast product on ruminalbacterial diversity and metabolome of beef cattle. *J Anim Sci* 2019;97:395.
- Sawatdeenarunat, C., Surendra, K. C., Takara, D., Oechsner, H., & Khanal, S. K. (2015). Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: challenges and opportunities. *Bioresource technology*, 178, 178-186.
- Suen, G., et al. (2011). Complete genome of the cellulolytic ruminal bacterium *Ruminococcus albus* 7. *Journal of bacteriology*, 193(19), 5574–5575. <https://doi.org/10.1128/JB.05621-11>.

- Sun, K., Liu, H., Fan, H., Liu, T., & Zheng, C. (2021). Research progress on the application of feed additives in ruminal methane emission reduction: a review. *PeerJ*, 9, e11151.
- Takizawa S, Baba Y, Chika T, Fukuda Y, Nakai Y. Preservation of rumen fluid for the pretreatment of waste paper to improve methane production. *Waste Manag* 2019;87:672–8.
- Teather, R. M., & Ohmiya, K. (1991). *Physiological Aspects of Digestion and Metabolism in Ruminants*. Academic Press. Halaman 701-717.
- Theodorou, M. K., & France, J. (2005). Rumen microorganisms and their interactions. In *Quantitative aspects of ruminant digestion and metabolism* (pp. 207–228). CABI Publishing. <https://doi.org/10.1079/9780851998145.0207>
- Wang, L., Zhang, G., Li, Y., & Zhang, Y. (2020). Effects of high forage/concentrate diet on volatile fatty acid production and the microorganisms involved in VFA production in cow rumen. *Animals*, 10(2), 223.
- Wang MZ, Jing Y, Wang Y, Liu S, Gao J, Ouyang J. Effects of unsaturation of longchain fatty acids on rumen protozoal engulfment and microbial protein recycling in protozoa in vitro. *Anim Prod Sci* 2019;59:647–53.
- Williams AG, Withers S, Sutherland AD. Potensi bakteri yang diisolasi dari isi rumen domba North Ronaldsay pemakan rumput laut untuk menghidrolisis komponen rumput laut dan menghasilkan metana secara anaerobik secara in vitro. *Microb Biotechnol* 2013;6:45–52
- Wright, A. D. G. (2015). Rumen protozoa. *Rumen microbiology: from evolution to revolution*, 113–120.
- Wood TA, Wallace RJ, Rowe A, Price J, Y'ane zruizDR, Murray P. Encapsulated fumaric acid as a feed ingredient to decrease ruminal methane emissions. *Anim Feed Sci Technol* 2009;152:62–71.
- Xing BS, Han YL, Cao SF, Wen JW, Zhang KD, Yuan HL, et al. Cosubstrate strategy for enhancing lignocellulose degradation during rumen fermentation in vitro: characteristics and microorganism composition. *Chemosphere* 2020;250:126104.
- Xing, B. S., Han, Y., Wang, X. C., Wen, J., Cao, S., Zhang, K., ... & Yuan, H. (2020). Persistent action of cow rumen microorganisms in enhancing biodegradation of wheat straw by rumen fermentation. *Science of the total environment*, 715, 136529.
- Yeadam J, Hkang K, Lee C. Enhancing anaerobic digestion of vegetable waste and cellulose by bioaugmentation with rumen culture. *Membr Water Treat* 2019;10:213–21.
- Yerima M, Ogunkoya M, Sada-Maryam A. Rumen derived anaerobic digestion of water hyacinth (*Eicchornia crassipes*). *Afr J Biotechnol* 2009;8:4173–4.
- Yue ZB, Yu HQ. Anaerobic batch degradation of cattail by rumen cultures. *Int J Environ Pollut* 2009;38:299–308.

- Zheng, Y., Wang, X., & Yang, F. (2019). Improving the anaerobic digestion of switchgrass via cofermentation of rumen microorganisms (rumen bacteria, protozoa, and fungi) and a biogas slurry. *Energy & Fuels*, 33(2), 1185-1195.
- Zhu Z, Song ZH, Cao LT, Wang Y, Zhou WZ, Zhou P, et al. Effects of traditional Chinese medicine formula on ruminal fermentation, enzyme activities and nutri
- Zhou, M., Chen, Y., & Guan, L. L. (2015). Rumen bacteria. *Rumen microbiology: From evolution to revolution*, 79-95.
- Zoghalmi, A., & Paës, G. (2019). Lignocellulosic biomass: understanding recalcitrance and predicting hydrolysis. *Frontiers in chemistry*, 7, 874.