

Pemanfaatan Enzim Lignoselulase untuk Mendukung Produktivitas Ternak Ruminansia; Systematic Literature Review

Utilization of Lignocellulase Enzyme to Support Ruminant Livestock Productivity; Systematic Literature Review

Fitria Nur Aini*¹, Kasri², M. Fadhlirrahman Latief^{2,3}

¹Program Studi Penyuluhan Peternakan dan Kesejahteraan Hewan, Politeknik Pembangunan Pertanian Malang, Jl. DR. Cipto No.144a, Sengkrajan, Bedali, Kec. Lawang, Kabupaten Malang, Jawa Timur 65215

²Mahasiswa Pascasarjana, Fakultas Peternakan, Universitas Brawijaya, Jl. Veteran Malang, Kota Malang, Jawa Timur. 65145

³Departemen Nutrisi dan Makanan Ternak, Fakultas Peternakan, Universitas Hasanuddin, Jl. Perintis Kemerdekaan KM. 10, Kota Makassar, 90245

e-mail: *¹fitrianuraini@polbangtanmalang.ac.id

ABSTRAK

Lignoselulosa adalah sumber energi utama pada ternak ruminansia. Namun, nilai nutrisinya masih rendah karena tidak dapat dicerna secara optimal. Penelitian ini menggunakan metode *systematic literature review* (SLR) yang bertujuan untuk mengkaji pemberian enzim lignoselulase pada ternak ruminansia. Jenis penelitian ini adalah deskriptif kualitatif dengan mengambil data dari literatur yang relevan. Subjek dan objek penelitian yaitu sumber enzim lignoselulase dan ternak ruminansia. SLR ini menggunakan PICOC untuk mensistemasi penelusuran dalam peninjauan jurnal, yakni *population* : pakan ternak ruminansia, *intervention* : enzim lignoselulase, *comparison* : teknologi pengolahan fisik dan kimia, *outcome* : degradasi lignoselulosa, pencernaan, *context* : nutrisi ternak. Pencarian literatur dilakukan pada laman Scindirect, PubMed, dan Wiley. Hasil pencarian menemukan 185 artikel. Hasil review menunjukkan bahwa pemanfaatan enzim lignoselulase untuk meningkatkan produktivitas ternak ruminansia perlu dilakukan dengan kombinasi perlakuan dan pra-perlakuan. Perlakuan yang tepat akan dapat meningkatkan pencernaan nutrisi lignoselulosa dan meningkatkan jumlah nutrisi tersedia yang dapat dimanfaatkan oleh mikroba rumen. Berbagai sistem enzimatik dalam mekanisme degradasi diperlukan untuk memastikan bahwa setiap komponen lignoselulosa dapat terdegradasi secara efisien yang merupakan kunci pemanenan energi maksimum oleh ternak ruminansia.

Kata kunci— *degradasi nutrisi, kualitas nutrisi, lignin peroksidase, selulase, xylanase*

ABSTRACT

Lignocellulase is the main source of energy in ruminants. However, the nutritional value is still low and cannot be digested optimally. This study used the Systematic Literature Review (SLR) method which aimed to study the impact of administering lignocellulase enzymes to ruminants. This type of research is descriptive qualitative by taking data from relevant literature. The subjects and objects of the research are lignocellulosic enzymes and ruminants. This SLR uses PICOC to systematize tracing in journal reports, as the

following populations; ruminant ruminant feed, intervention: lignocellulase enzymes, comparison: physical and chemical processing technology, results: lignocellulosic degradation, digestibility, context: animal nutrition. A literature search was carried out on the Scintdirect, PubMed, and Wiley pages. The search found 185 articles. The results of the review show that the use of lignocellulase enzymes to increase the productivity of ruminants needs to be done with a combination of treatment and pre-treatment. Appropriate treatment will increase the digestibility of lignocellulosic nutrients and increase the amount of available nutrients that can be utilized by rumen microbes. Various enzymatic systems in the degradation mechanism are needed to ensure that each lignocellulosic component can be efficiently degraded which is the key to maximum energy harvest by ruminants.

Keywords— *cellulase, lignin peroxidase, xylanase, nutrition degradation, nutrient quality*

PENDAHULUAN

Sumber energi utama pada ternak ruminansia diperoleh dari rumput dan limbah pertanian yang memiliki nilai pencernaan rendah. Sebanyak kurang lebih 75% dari pakan tersebut merupakan karbohidrat dengan komponen utama berupa polisakarida struktural dalam bentuk lignoselulosa [1]. Material lignoselulosa tersusun dari senyawa polimer selulosa (24-47%), hemiselulosa (11-27%) dan lignin (6-24%) yang saling berikatan satu sama lain. Lignoselulosa yang merupakan komponen dinding sel pada hijauan dan pakan ternak tidak sepenuhnya dapat dicerna. Kecernaan selulosa pada ternak ruminansia berkisar antara 400-600 g/kg [2]. Namun demikian, fraksi yang tidak tercerna ini merepresentasikan sumber nutrisi yang masih bisa tersedia dan dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan produktivitas ternak [3].

Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan nilai nutrisinya adalah dengan memanfaatkan enzim lignoselulase. Lignoselulase atau enzim pendegradasi lignoselulosa umumnya terdiri dari enzim pendegradasi lignin seperti lignin peroksidase (LiP), lakase, mangan peroksidase (MnP) dan enzim hidrolitik seperti xilanase,

selobiohidrolase (CBH), dan karboksimetil selulase (CMCase) [4]. Penggunaan enzim dalam proses degradasi lignoselulosa akan menghasilkan gula reduksi yang merupakan nutrisi tersedia. Hal ini diharapkan dapat meningkatkan produktivitas ternak ruminansia yang memakannya.

Meskipun potensi pemanfaatan enzim lignoselulase ini menarik perhatian para peneliti dan praktisi peternakan, masih ada kebutuhan untuk merangkum, menganalisis, dan menyajikan bukti-bukti ilmiah terbaru secara sistematis. Tinjauan literatur sistematis merupakan pendekatan yang efektif dalam mengumpulkan dan mengevaluasi studi-studi terbaru yang berkaitan dengan pemanfaatan enzim lignoselulase dalam mendukung produktivitas ternak ruminansia. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji aktivitas enzim lignoselulase dalam mendegradasi lignoselulosa dan mengevaluasi penambahan enzim lignoselulase terhadap produktivitas ternak ruminansia.

METODE PENELITIAN

Systematic literature review (SLR) adalah suatu kegiatan penelitian yang dilakukan dengan mengumpulkan,

mengidentifikasi, dan menganalisis hasil-hasil kajian, menggunakan prosedur yang terstruktur, transparan, dan dapat direplikasi untuk menjawab pertanyaan atau hipotesis berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditentukan sebelumnya [5]. SLR tergantung pada ruang lingkupnya yang memungkinkan pencarian dan identifikasi dilakukan secara andal memilih literatur yang relevan tentang suatu topik dan mengutamakan pada poin-poin penting dari pengetahuan terkini [6, 7]. Adapun tahapan SLR yaitu perencanaan (*planning*), pelaksanaan (*conducting*), dan pelaporan (*reporting*).

Perencanaan

Metode SLR ini menggunakan PICOC untuk mensistemasi penelusuran dalam peninjauan jurnal, sebagai berikut :

- *Population* : Pakan Ruminansia
- *Intervention* : Enzim Lignoselulase
- *Comparison* : Teknologi Pengolahan Fisik dan Kimia
- *Outcome* : Degradasi Lignoselulosa, Kecernaan
- *Context* : Nutrisi Ternak

Kata kunci dan sinonim

Kata kunci yang digunakan dalam pencarian sebagai berikut : *lignocellulosic enzyme, cellulase, lignin peroxidase, xylanase, nutrient degradation, digestibility, nutrient metabolism, nutrient quality*

Dengan pencarian sebagai berikut:

("feed ruminant" and ("lignocellulosic enzyme" or "lignin peroxidase" or "xylanase") and ("nutrition degradation" or "digestibility" or "nutrient metabolism" or "nutrient quality"))

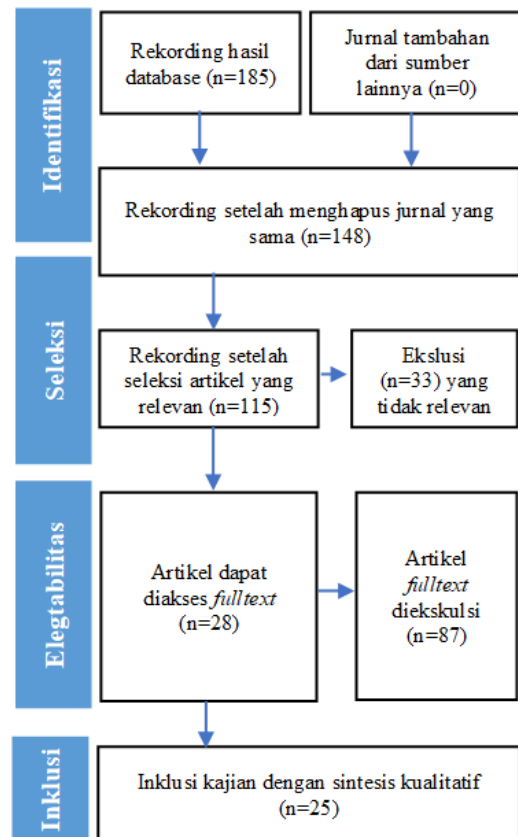
Sumber: Science Direct (<https://www.sciencedirect.com/>),

Wiley Online Library (<https://onlinelibrary.wiley.com/>,

PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>)

Pelaksanaan

Pelaksanaan penelitian meliputi kegiatan identifikasi, seleksi, elegtabilitas dan inklusi.



Gambar 1. Alur studi literatur berbasis SLR

Identifikasi jurnal berdasarkan sumber literatur memenuhi kriteria seleksi jurnal yaitu kriteria inklusi (alternatif zat aditif pakan, enzim lignoselulase, jurnal bahasa indonesia dan bahasa inggris, pakan ternak, terbitan setelah tahun-2000, hewan ruminansia) dan kriteria eksklusi (selain alternatif zat aditif pakan bukan pakan, selain enzim lignoselulase, selain jurnal bahasa indonesia dan bahasa inggris, limbah industry, terbitan sebelum tahun 2000, hewan non ruminansia).

Pelaksanaan

Penelusuran dengan menggunakan kata kunci berikut: ("feed ruminant") and ("lignocellulosic enzyme") and ("chemical and physical feed processing technology") and ("nutrition

degradation" or "nutrient metabolism" or "nutrient quality")

Pelaporan dengan hasil mereview jurnal dilakukan secara deskriptif.

Pelaporan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1. Perlakuan untuk Mendorong Proses Enzimatik

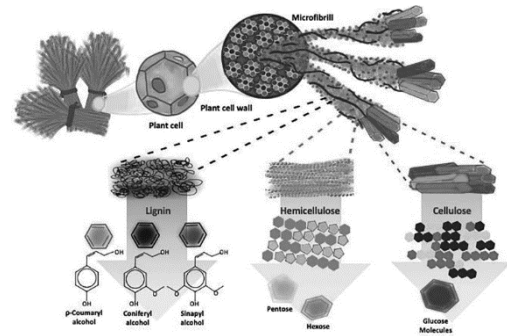
No	Perlakuan	Manfaat	Rujukan
1	Perlakuan Biologis	Mendorong dekonstruksi dinding sel lignoselulosa, Ramah lingkungan dan hemat energi.	[8]
2	Perlakuan Enzimatis / Sakarifikasi Enzimatik	Kunci dalam ekstraksi gula dari biomasa lignoselulosa, Persiapan untuk konversi biokimia.	[9]
3	Integrasi Proses Sakarifikasi dan Pra-Perlakuan	Pra-perlakuan, sakarifikasi, dan fermentasi memberikan hasil yang memuaskan.	[10]
3	Perlakuan Biogis dengan Kultivasi jamur	Kultivasi jamur dan bakteri anaerob dengan prinsip <i>cross-feeding</i> . Menghasilkan butirir dan butanol.	[11]
4	Hidrolisis Lignoselulosa	Jamur menghasilkan glukosa, xilosa, asetat, format etanol, dan laktat sekitar 7-11 mM.	[11]
5	Kombinasi Perlakuan	Penggunaan pelarut eutektik dan etanol pada pra-perlakuan meningkatkan hidrolisis enzimatik dan glukosa.	[12]
6	Pra-perlakuan	Meningkatkan luas permukaan spesifik biomassa, Menurunkan kandungan xilan dan lignin, Memisahkan lignin dan meningkatkan pencernaan selulosa.	[12]

Tabel 1. menunjukkan bahwa pra-perlakuan ini merupakan metode yang menjanjikan untuk memisahkan lignin dan meningkatkan pencernaan selulosa.

Degradasi Lignoselulosa oleh Bakteri Rumen

Sejumlah mikroorganisme yang beragam di dalam rumen saling bersinergi dalam mendukung fermentasi bahan lignoselulosa. Mikroorganisme di dalam rumen dapat menghasilkan berbagai enzim yang secara fungsional saling bersinergi dalam proses degradasi lignoselulosa[13].

Kelompok *bacteroidetes* menghasilkan enzim yang terlibat dalam pemanfaatan polisakarida dalam bentuk yang tersedia. Firmicutes menggunakan enzim bebas dan selulosom atau enzim pendegradasi selulosa. Fibrobacters



mensekresikan enzim pendegradasi lignoselulosa pada permukaan sel atau melepaskannya pada media ekstraseluler dalam vesikel membran. Mekanisme ini terbukti sangat efektif dalam pemecahan selulosa. *Bacteroidetes* dan *firmicutes* di dalam rumen dapat mendegradasi berbagai polisakarida, sedangkan mikroorganisme lainnya hanya dapat mendegradasi polisakarida tertentu. *Verrucomicrobia* dan *spirochaetes* memiliki sistem enzim untuk pemecahan polisakarida kompleks seperti xiloglukan, peptidoglikan, dan pektin. Keragaman mekanisme degradasi diperlukan untuk memastikan bahwa setiap komponen lignoselulosa dapat terdegradasi secara efisien, yang merupakan kunci pemanenan energi maksimum oleh ternak ruminansia [14]

Gambar 2. Struktur lignoselulosa [15].

Selulosa

Selulosa tersusun dari subunit D-glukosa yang berikatan β -1,4 glikosidik. Pada tanaman, selulosa berada dalam bentuk kristal yang terorganisir dan dalam bentuk yang tidak terorganisir dengan baik (*amorf*). Selulosa dibundel menjadi satu sehingga membentuk sesuatu yang disebut fibril selulosa. Senyawa fibril ini sebagian besar independen dan berikatan lemah melalui ikatan hidrogen [16, 17].

Hemiselulosa

Hemiselulosa adalah karbohidrat struktural kompleks yang terdiri dari polimer yang berbeda seperti pentose (misalnya xilosa dan arabinosa), heksosa (seperti manosa, glukosa dan galaktosa). Hemiselulosa memiliki berat molekul lebih rendah dari selulosa dan cabang dengan rantai pendek yang terdiri dari gula yang berbeda yang merupakan polimer yang mudah terhidrolisis. Hemiselulosa berfungsi sebagai penghubung antara lignin dan selulosa

yang menyebabkan struktur lignoselulosa menjadi lebih kaku [17]. Kelarutan senyawa hemiselulosa secara berurut dari tinggi ke rendah yakni manosa, xilosa, glukosa, arabinosa, dan galaktosa. Kelarutan akan meningkat seiring dengan kenaikan suhu [18]. Sebagian hemiselulosa akan mulai terlarut pada suhu 150°C. Namun kelarutan hemiselulosa tidak hanya tergantung pada suhu, tapi juga pada pH dan kadar air [16].

Komponen utama hemiselulosa pada tanaman berkayu keras dan tanaman pertanian (seperti rumput dan jerami) adalah xilan, sedangkan pada tanaman berkayu lunak adalah manan [16, 19]. Xilan merupakan polimer xilosa yang berikatan β 1-4 dengan jumlah monomer 150-200 unit [20].

Lignin

Lignin adalah heteropolimer yang berbentuk amorf atau tidak beraturan yang terdiri dari tiga unit fenilpropana yang berbeda (p-coumaryl, coniferyl, dan sinapyl alcohol) yang saling berhubungan. Kegunaan utama lignin pada tanaman adalah untuk membentuk struktur tanaman, impermeabilitas, dan ketahanan terhadap serangan mikroba dan stress oksidatif. Lignin tidak larut di dalam air sehingga degradasi lignin sangat sulit dilakukan [16]. Kelarutan lignin di dalam air dimulai pada suhu sekitar 180°C dalam kondisi netral [21]. Sedangkan kelarutan lignin dalam kondisi asam tergantung pada prekusornya (p-coumaryl, coniferyl, sinapyl alcohol atau kombinasinya) [22].

Salah satu cara untuk meningkatkan nilai pencernaan lignoselulosa ialah dengan menggunakan enzim. Enzim adalah molekul biopolimer yang tersusun dari asam amino dalam komposisi yang teratur dan tetap. Enzim berfungsi

penting di dalam sel diantaranya untuk mengkatalisis reaksi konversi energi [22]. Enzim bersifat spesifik menyesuaikan substratnya. Beberapa enzim yang berperan dalam mendegradasi lignoselulosa diantaranya enzim selulase, xilanase, dan lignin peroxidase.

Enzim Pendegradasi Lignoselulosa

Umumnya enzim lignoselulase didapatkan dari bakteri dan fungi (jamur), enzim dari fungi memiliki peran lebih kuat dalam mendegradasi lignoselulose.

Selulase

Beberapa hasil penelitian menunjukkan performa ternak yang positif ketika pemberian enzim fibrolitik pada pakan ternak ruminansia. Selulosa adalah enzim yang dapat memecah senyawa selulosa menjadi gula sederhana seperti glukosa. Enzim ini biasanya ditemukan pada mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan protozoa yang hidup di lingkungan yang kaya akan selulosa, seperti di dalam rumen hewan ruminansia [23].

Enzim lignoselulolitik yang dihasilkan oleh bakteri rumen kerbau. Bakteri-bakteri tersebut diambil dari sampel rumen kerbau dan digunakan untuk membuat perpustakaan metagenomik. Dari perpustakaan tersebut, dilakukan screening untuk mencari enzim lignoselulolitik yang baru dan potensial untuk digunakan dalam aplikasi industri. Salah satu enzim yang berhasil diisolasi dan dikarakterisasi adalah endoglukanase BT-01 yang memiliki aktivitas optimum pada suhu 50°C dan pH 6,0 [24].

Xilanase

Enzim xilanase mempunyai kemampuan dalam menghidrolisis hemiselulosa jenis xilan (polimer dari xilosa dan xilo-oligosakarida). Sebagian

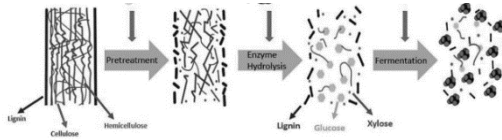
besar xilanase berupa protein kecil dengan berat molekul 15.000-30.000 Dalton, aktif pada suhu 55°C dengan pH 9, serta Xilanase cenderung stabil pada kondisi suhu 60°C dan pH normal [25]. Xilanase dikelompokkan berdasarkan substrat yang dihidrolisis yakni β -xilosidase, eksoxilanase dan endoxilanase. β -xilosidase memiliki kemampuan menghidrolisis xilo-oligosakarida rantai pendek menjadi xilosa. Eksoxilanase dapat memutus rantai xilan (polimer dari xilosa) pada ujung reduksi. Produk utama yang dihasilkan ialah xilosa dan sejumlah oligosakarida rantai pendek. Endoxilanase mampu memutus ikatan β 1-4 pada bagian dalam rantai xylan secara teratur. Penggunaan xilanase pada pakan ayam broiler dapat mengurangi viskositas pencernaan, meningkatkan bobot badan dan efisiensi konversi pakan [23].

Faktor Pembatas Hidrolisis

Hidrolisis lignoselulosa secara enzimatis dibatasi oleh beberapa faktor diantaranya kristalinitas selulosa, derajat polimerisasi, kadar air, luas permukaan dan kandungan lignin. Beberapa peneliti menyebutkan bahwa kristalinitas hanya membatasi hidrolisis enzimatis pada satu jam pertama, namun tidak hidrolisis enzimatis pada tiga hari. Pengecilan ukuran partikel dan peningkatan luas permukaan yang tersedia akan memengaruhi laju hidrolisis.

Faktor pembatas utama dalam hidrolisis lignoselulosa ialah kesesuaian antara ukuran pori substrat dengan ukuran enzim. Penghilangan hemiselulosa dapat meningkatkan ukuran pori-pori substrat sehingga memungkinkan untuk meningkatkan jumlah selulosa yang terhidrolisis. Perlakuan pengeringan dapat menyebabkan kerusakan struktur pori sehingga akan menurunkan proses

hidrolisis enzimatis. Enzim selulase dapat terperangkap di dalam pori apabila area internal jauh lebih besar dibandingkan area eksternal.



Lignin membatasi proses hidrolisis secara enzimatis dengan bertindak sebagai pelindung bagian substrat sehingga tidak dapat tercerna [26]. Adapun perbandingan antar perlakuan terdapat pada tabel 2.

Gambar 3. Langkah pemecahan lignoselulosa biomassa [15].

Tabel 2. Perbandingan dengan Perlakuan Lain

No	Perlakuan Lainnya	Dampak	Rujukan
1	Inokulasi dengan Bakteri Eksogen	Mempercepat kenaikan suhu ,memperpanjang fase termofilik. meningkatkan laju degradasi selulosa, hemiselulosa, dan lignin.	[27]
2	Inokulasi dengan Jamur <i>P. ostreatus</i>	Meningkatkan proses bidegradasi secara enzimatik. aktivitas enzimatik LiP dan Lac tertinggi pada hari ke-14. - MnP menunjukkan stabilitas hingga 21 hari fermentasi.	[28]
3	Jamur Anaerobic (JA)	Penting dalam degradasi dinding dalam rumen, berperan dalam metana pembentukan dan penyediaan nutrisi bagi inang.	[29]
4	Berbagai Metode/Teknik Pra-perlakuan	Berbagai metode pra-perlakuan seperti fisik mekanik, fisikokimia, kimiawi, dan biologi.	[30]

Tantangan

Lignoselulosa yang tersusun dari selulosa, hemiselulosa dan lignin merupakan potensi sumber daya alam yang menjanjikan untuk memproduksi bahan kimia dan bahan bakar yang berkelanjutan. Alasan tersebut terbukti dari berbagai hasil penelitian yang berupaya menemukan strategi yang tepat untuk membuka potensi penuh lignoselulosa secara efisien. Berbagai metode dan kemajuan teknologi telah banyak dilakukan untuk mewujudkan hal tersebut. Hal ini tentu menjadi tantangan sendiri bagi dunia peternakan untuk memanfaatkan potensi yang ada

dari lignoselulosa, khususnya melalui fungsi ternak ruminansia.

Pemanfaatan lignoselulosa sebagai pakan ternak ruminansia masih memiliki banyak kelemahan terutama karena nilai nutrisinya yang rendah sehingga belum mampu menunjukkan proforma ternak yang optimal. Pemanfaatan lignoselulosa melalui ternak ruminansia merupakan cara yang mudah, efisien dan ramah lingkungan jika dibandingkan dengan peruntukkan lain di bidang industri. Namun hal ini akan kalah bersaing apabila aplikasinya dalam hal pemberian pakan tidak dilakukan dengan serius.

Diinjau dari konteks sistem usaha yang berkelanjutan (*sustainability*), lignoselulosa yang saat ini menjadi bahan melimpah bahkan kadang terbuang, bisa jadi akan bertransformasi menjadi bahan yang bernilai ekonomi tinggi dan diperebutkan di berbagai lini. Bidang peternakan seharusnya bisa menjadi garda terdepan dalam memperjuangkan pemanfaatan lignoselulosa sebagai pakan ternak ruminansia yang juga dapat menghasilkan produk bernilai tinggi dan penting bagi kehidupan manusia, yaitu protein hewani.

KESIMPULAN

Pemanfaatan enzim lignoselulase untuk meningkatkan produktivitas ternak ruminansia perlu dilakukan dengan kombinasi perlakuan dan pra-perlakuan. Perlakuan yang tepat akan dapat meningkatkan pencernaan nutrisi lignoselulosa dan meningkatkan jumlah nutrisi tersedia yang dapat dimanfaatkan oleh mikroba rumen. Berbagai sistem enzimatik dalam mekanisme degradasi diperlukan untuk memastikan bahwa setiap komponen lignoselulosa dapat terdegradasi secara efisien yang merupakan kunci pemanenan energi maksimum oleh ternak ruminansia.

SARAN

Penelitian lebih lanjut tetap diperlukan untuk menggali potensi pemanfaatan lignoselulase biomassa untuk ternak ruminansia.

DAFTAR PUSTAKA

- Soetanto, H. and Kusmartono, 2021, *Ilmu Nutrisi Ternak Ruminansia: Tingkat Lanjut*. Universitas Brawijaya Press.
- Van Soest, P., 1994, *Fiber and physicochemical properties of feeds*, in *Nutritional ecology of the ruminant*. Cornell University Press, Ithaca. p. 140-155.
- Llewellyn, D., Marston, T., Teutmacher, K., Higgins, J., & Melgarejo, T., 2010, Evaluation of low molecular weight fractions and crude enzyme preparation from a Trichoderma cellulase complex as a treatment for fibrous feeds. *Animal feed science and technology*, 160(1-2): p. 39-48.
- Devi, R., Thakur, R., Kapoor, S., Joshi, S. J., & Kumar, A., 2023, Comparative assessment on lignocellulose degrading enzymes and bioethanol production from spent mushroom substrate of Calocybe indica and Volvariella volvacea, *Environ Sci Pollut Res Int*.
- Damigos, D., 2023, How Much Are Consumers Willing to Pay for a Greener Hotel Industry? A Systematic Literature Review, *Sustainability*, 15(11).
- Carrera-Rivera, A., Ochoa, W., Larrinaga, F., & Lasa, G., 2022, How-to conduct a systematic literature review: A quick guide for computer science research. *MethodsX*. 9: p. 101895.
- Palmatier, R.W., Houston, M.B., and Hulland, J., 2018, *Review articles: purpose, process, and structure*, Springer. p. 1-5.
- Chen, S. and M., 2023, Davaritouchae, Nature-inspired pretreatment of lignocellulose - Perspective and development. *Bioresour Technol*. 369: p. 128456.
- Arora, R., Singh, P., Sarangi, P. K., Kumar, S., & Chandel, A. K., 2023, A critical assessment on scalable technologies using high solids loadings in lignocellulose biorefinery: challenges and solutions. *Crit Rev Biotechnol*. 1-18.
- Moodley, P., R.C. Ray, and E.B. Gueguim Kana., 2023, Advances

- in lignocellulosic biofuel production systems. *Applied Biotechnology Reviews Series*. Cambridge, MA: Woodhead Publishing.
- Brown, J.L., Perisin, M. A., Swift, C. L., Benyamin, M., Liu, S., Singan, V., Zhang, Y., Savage, E., Pennacchio, C., Grigoriev, I. V., & O'Malley, M. A., 2023, Co-cultivation of anaerobic fungi with *Clostridium acetobutylicum* bolsters butyrate and butanol production from cellulose and lignocellulose. *J Ind Microbiol Biotechnol*. 49(6).
- Cui, P. , Ye, Z., Chai, M., Yuan, J., Xiong, Y., Yang, H., & Yao, L., 2022, Effective fractionation of lignocellulose components and lignin valorization by combination of deep eutectic solvent with ethanol. *Front Bioeng Biotechnol*. 10: p. 1115469.
- Wang, Q. Xiao, T., Juan, J., Qian, W., Zhang, J., Chen, H., Shen, X., & Huang, J., 2023, Lignocellulose Degradation Efficiency of *Agaricus bisporus* Strains Grown on Wheat Straw-Based Compost. *J Agric Food Chem*. 71(28): p. 10607-10615.
- Gharechahi., Vahidi, M. F., Sharifi, G., Ariaeenejad, S., Ding, X. Z., Han, J. L., & Salekdeh, G. H., 2023, Lignocellulose degradation by rumen bacterial communities: New insights from metagenome analyses. *Environ Res*. 229: p. 115925.
- V. Ponnusami, K. B. Uppuluri, S. Rangabhashiyam and P. Singh., 2023, Lignocellulosic Biomass Refining for Second Generation Biofuel Production. Publisher: CRC Press.
- Fengel, D. and G. Wegener, 2011, *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter.
- Laureano-Perez, L. Teymouri, H. Alizadeh and B. E. Dale., 2005, Understanding factors that limit enzymatic hydrolysis of biomass: characterization of pretreated corn stover. *Applied biochemistry and biotechnology*. 124: p. 1081-1099.
- Gray, F.V., A.F. Pilgrim, and R.A. Weller. , 1985, The digestion of foodstuffs in the stomach of the sheep and the passage of digesta through its compartments. I. Cellulose, pentosans and solids. *Br J Nutr*. 12(4): p. 404-13.
- Saha, B.C., 2004, Lignocellulose biodegradation and applications in biotechnology. ACS Publications.
- Sunna, A. and G. Antranikian, 1997, Xylanolytic enzymes from fungi and bacteria. Critical reviews in biotechnology. 17(1): p. 39-67.
- Bobleter, O., G. Bonn, and W. Prutsch., 1991, *Steam explosion-hydrothermolysis-organosolv. A comparison*. Steam Explosion Techniques. Gordon and Breach, Philadelphia, 1991: p. 59-82.
- Grabber, J.H., 2005, How do lignin composition, structure, and cross-linking affect degradability? A review of cell wall model studies. *Crop science*. 45(3): p. 820-831.
- Richana, N., 2002, Produksi dan prospek enzim xilanase dalam pengembangan bioindustri di Indonesia. *Buletin AgroBio*. 5(1): p. 29-36.
- Nguyen, V.T. Wanapat, M., Khejornsart, P., & Kongmun, P., 2012, Nutrient digestibility and ruminal fermentation characteristic in swamp buffaloes fed on chemically treated rice straw and urea. *Trop Anim Health Prod*, 2012. 44(3): p. 629-36.

- Tsujibo, H. Miyamoto, K., Kuda, T., Minami, K., Sakamoto, T., Hasegawa, T., & Inamori, Y., 1992, Purification, properties, and partial amino acid sequences of thermostable xylanases from *Streptomyces thermoviolaceus* OPC-520. *Applied and Environmental Microbiology*. 58(1): p. 371-375.
- Hendriks, A.T. and G. Zeeman., 2009, Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol*. 100(1): p. 10-8.
- Zhou, L., , Yang, X., Wang, X., Feng, L., Wang, Z., Dai, J., Zhang, H., & Xie, Y., 2023, Effects of bacterial inoculation on lignocellulose degradation and microbial properties during cow dung composting. *Bioengineered*, 2023. 14(1): p. 213-228.
- Astudillo-Neira, R., Muñoz-Nuñez, E., Quiroz-Carreno, S., Avila-Stagno, J., & Alarcon-Enos, 2022, Bioconversion in ryegrass-fescue hay by *pleurotus ostreatus* to increase their nutritional value for ruminant. *Agriculture*. 12(4): p. 534.
- Hartinger, T. and Q. Zebeli., 2021, The Present Role and New Potentials of Anaerobic Fungi in Ruminant Nutrition. *J. Fungi* 2021, 7, 200.
- Kuila, A., V. Sharma, 2017, *Lignocellulosic biomass production and industrial applications*. 1st ed. C. Ebook Central Academic. Hoboken: Wiley-Scrivener.