

Potensi Limbah Hasil Pertanian Padi menjadi Sumber Bioenergi melalui Konsep Biorefineri dengan Pendekatan *P-Graph* dan Analisis Ekonomi Teknik di Kabupaten Sleman, Yogyakarta

Diah Ayu Prawitasari

Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam
Indonesia, Yogyakarta, Indonesia
E-mail: diahayuprawitasari@uii.ac.id

ABSTRAK

Limbah hasil pertanian, khususnya dari padi seperti jerami, sekam, dan dedak, merupakan salah satu biomassa yang melimpah di Indonesia khususnya di Kabupaten Sleman, DI Yogyakarta yang merupakan salah satu wilayah dengan produktivitas padi tertinggi. Potensi limbah padi dapat dimanfaatkan sebagai sumber bioenergi dengan pendekatan biorefineri. Konsep biorefineri adalah proses pengolahan biomassa yang menghasilkan berbagai macam produk hingga produk turunan untuk mencapai keberlanjutan. Analisis potensi limbah biomassa ini dilakukan dengan menggunakan *p-graph* dan ekonomi teknik Berdasarkan analisis optimasi dengan *p-graph*, solusi optimal dan solusi maksimal diperoleh setelah dilakukan *running* dari alur *superstructure*. Solusi optimal menunjukkan proses transesterifikasi dedak padi menjadi biodiesel yang lebih *feasible* dengan keuntungan 9000 USD/tahun. Untuk solusi maksimal, analisis ekonomi dilakukan karena produk yang dihasilkan lebih banyak sehingga pendekatan bioferineri bisa diimplementasi. Hasil ekonomi teknik menunjukkan beberapa produk bioenergi yang menjadi investasi awal akan kembali seluruhnya pada tahun ke-8. Nilai IRR diperoleh sebesar 21.7%, sedangkan MARR (*Minimum Attractive Rate of Return*) 15% yang menunjukkan investasi layak untuk mendapatkan pendanaan. Selain itu dari sisi lingkungan, pemanfaatan limbah biomasa untuk produksi bioenergi menghasilkan dampak positif berupa pengurangan emisi gas rumah kaca dan polusi, serta peningkatan kesuburan tanah melalui aplikasi biochar. Dari sisi sosial, produksi bioenergi berbasis komunitas mampu meningkatkan pendapatan, kesejahteraan masyarakat, produksi bioenergi, dan mendukung kemandirian energi dan keberlanjutan energi.

Kata kunci: Bioenergi, Ekonomi Teknik, Limbah Padi, *P-pragh*

ABSTRAK

Agricultural waste, especially from rice such as straw, husks, and bran, is one of the abundant biomasses in Indonesia, particularly in Sleman Regency, DI Yogyakarta, which is one of the regions with the highest rice productivity. The potential of rice waste can be used as a source of bioenergy using a biorefinery approach. The concept of a biorefinery is the processing of biomass that produces various products and by-products to achieve sustainability. The analysis of the potential of this biomass waste was conducted using p-graph and techno-economics. Based on the optimization analysis with the p-graph, the optimal and maximal solutions were obtained after running the superstructure flow. The optimal solution indicates that the transesterification process of rice bran into biodiesel is more feasible with a profit of 9000 USD/year. For the maximal solution, an economic analysis was conducted because the products generated are more numerous, allowing for the implementation of a biorefinery approach. The results of the techno-economic analysis show that the production of several bioenergy products will fully recoup the initial investment by the 8th year. The IRR value obtained is 21.7%, while the MARR (Minimum Attractive Rate of Return) is 15%, indicating that the investment is viable for funding. Additionally, from an environmental perspective,

the use of biomass waste for bioenergy production has a positive impact by reducing greenhouse gas emissions and pollution, as well as enhancing soil fertility through the application of biochar. From a social perspective, community-based bioenergy production can increase income, improve community welfare, enhance bioenergy production, and support energy independence and sustainability.

Keywords: *Bioenergy, P-graph, Rice Waste, Technical Economics*

1. Pendahuluan

Pengelolaan limbah hasil pertanian yang berkelanjutan semakin menjadi isu strategis dalam konteks pembangunan global yang berorientasi pada mitigasi perubahan iklim dan pemenuhan kebutuhan energi terbarukan. Di Indonesia, limbah pertanian, khususnya dari padi seperti jerami, sekam, dan dedak, merupakan salah satu biomassa yang melimpah. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik, Indonesia memproduksi lebih dari 50 juta ton padi setiap tahun, dengan sebagian besar biomassa limbah belum dimanfaatkan secara optimal (BPS, 2023). Di Kabupaten Sleman, DI Yogyakarta, merupakan salah satu wilayah dengan produktivitas padi yang tinggi dan biomassa limbah hasil pertanian yang dihasilkan sering kali hanya dibakar atau dibiarkan terdekomposisi secara alami. Aktivitas tersebut dapat menghasilkan emisi gas rumah kaca (GRK), seperti karbon dioksida (CO₂) dan metana (CH₄) yang dapat memperburuk krisis iklim (Elbasiouny et al, 2019). Selain itu, dampak dari dibiarkan terdekomposisi di tanah juga menyebabkan degradasi kualitas tanah akibat hilangnya bahan organik, dan potensi pencemaran air tanah akibat dekomposisi anaerobik (Elizabeth, 2021). Praktik ini juga menyebabkan hilangnya potensi nilai ekonomi dari biomassa tersebut sebagai sumber energi terbarukan atau bahan baku industri. Bioenergi merupakan salah satu solusi dari mitigasi perubahan iklim. Pemerintah juga mendorong program ekonomi sirkular yang mengintegrasikan aspek keberlanjutan lingkungan, ekonomi, dan sosial. Salah satu konsep yang dapat dikembangkan untuk mendorong ekonomi sirkular adalah konsep biorefineri.

Berdasarkan IEA Energy, konsep biorefineri adalah proses pengolahan biomassa yang menghasilkan berbagai macam produk hingga produk turunan untuk mencapai keberlanjutan. Konsep Biorefineri menawarkan solusi holistik untuk mengoptimalkan pemanfaatan limbah hasil pertanian sebagai sumber daya yang bernilai tambah. Biorefineri memungkinkan pemanfaatan limbah hasil pertanian sebagai bahan baku untuk menghasilkan produk bernilai tambah seperti bioenergi (bioetanol, biogas), biofertilizer, dan bahan bakar padat (solid fuel). Dalam konteks ini, pemanfaatan fungsi sebagai katalis biologis juga dalam proses konversi biomassa menjadi bioetanol merupakan salah satu opsi yang menarik untuk dieksplorasi lebih lanjut. Maka dari itu, limbah jerami padi dapat dimanfaatkan secara optimal untuk mendukung ketahanan energi terbarukan sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan memperkuat ketahanan energi nasional (Rathour et al., 2023). Hal tersebut merupakan target bagi Indonesia untuk mencapai bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025.

Pengelolaan limbah biomassa padi melalui pendekatan biorefineri di Kabupaten Sleman berpotensi menciptakan nilai tambah ekonomi bagi petani, mengurangi jejak karbon regional, dan menciptakan model pengelolaan biomassa yang dapat direplikasi di wilayah lain. Selain itu, pendekatan ini juga mendukung pencapaian tujuan Sustainable Development Goals (SDGs), terutama pada poin 7 (Energi Bersih dan Terjangkau), poin 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab), serta poin 13 (Penanganan Perubahan Iklim). Untuk mewujudkan capaian tersebut, pengelolaan limbah biomassa dengan konsep Biorefineri perlu dianalisis dan dioptimasi untuk merancang sebuah proses teknologi yang harapannya dapat dijadikan dasar untuk implementasi skala besar. Teknologi Biorefineri dapat dioptimalkan dengan metode p-graph, pemodelan sistematis berbasis graf. P-graph dapat menjadi solusi terintegrasi untuk merancang rantai proses konversi yang efisien. P-graph memungkinkan analisis skenario optimalisasi multi-produk sehingga memberikan rekomendasi strategi terbaik dalam pemanfaatan limbah hasil pertanian untuk menghasilkan energi terbarukan dan produk lainnya (Hassan et al., 2021). Dengan demikian, penelitian ini bertujuan

menganalisis potensi konversi limbah padi di Kabupaten Sleman menggunakan pendekatan Biorefineri berbasis *p-graph* serta analisis ekonomi berdasarkan pada hasil dari membagi jumlah bahan baku atau umpan biomassa dengan jumlah penjualan produk bioenergi.

2. Metode Penelitian

Rumusan masalah dapat ditentukan untuk menyelesaikan potensi konversi limbah padi menjadi produk bernilai tambah menggunakan pendekatan Biorefineri dengan mempertimbangkan faktor lingkungan dan ekonomi. Penelitian ini akan mengadopsi pendekatan campuran dengan metode kualitatif dan kuantitatif. Pada tahap awal, identifikasi potensi limbah padi dilakukan di Kabupaten Sleman, DIY melalui analisis data sekunder dari instansi terkait, seperti situs Badan Pusat Statistik, Dinas Pertanian Kabupaten Sleman, dan wawancara petani. Selanjutnya, studi literatur akan dilakukan untuk mengeksplorasi konsep Biorefineri dan aplikasinya dalam pemanfaatan limbah padi menjadi produk bioenergi.

Analisis alur proses akan dilakukan menggunakan perangkat lunak *p-graph* untuk merancang skenario optimasi pemanfaatan limbah padi menjadi produk bernilai tambah, seperti bioetanol, biofertilizer, dan produk lainnya. Pada *p-graph* perlu mempertimbangkan input dan output berupa aliran material dan energi menggunakan teknologi saat ini untuk menghasilkan produk yang diinginkan di setiap unit proses. Indikator teknis seperti *yield*, efisiensi, dan lain-lain akan ditetapkan berdasarkan data literatur untuk membangun model *p-graph*. Selain itu, terdapat asumsi-asumsi pendukung untuk menunjang analisis hasil analisis proses produksi. Hasil analisis akan dikombinasikan untuk memberikan gambaran

2.1 Simulasi *P-graph Framework* untuk Desain Biorefineri

Desain progress dengan *p-graph* menggunakan software PNS (*process network synthesis*). Software ini memungkinkan pembuatan model merepresentasi proses dengan struktur alur berarah dengan node-node mewakili material, produk, dan unit, serta panah yang menunjukkan aliran material dan energi antar node. *P-graph* terdiri dari empat tahap:

1. Identifikasi *raw material*, produk, dan unit proses.

Material, produk, dan unit proses diidentifikasi berdasarkan asumsi-asumsi dan neraca massa yang dianalisis dari beberapa sumber literatur. *Raw material* pada penelitian ini adalah limbah biomassa pertanian hasil produksi padi berupa jerami padi (*rice straw*), sekam padi (*rice husk*), dan dedak padi (*rice bran*). Potensi produk bioenergi yang dihasilkan dari masing-masing raw material tersebut adalah bioethanol, biodiesel, dan biochar. Dasar pemilihan produk bioenergi tersebut adalah karena kebutuhan dan nilai ekonomi yang tinggi.

2. Menentukan rasio aliran berdasarkan data literatur serta membangun alur *superstructure*

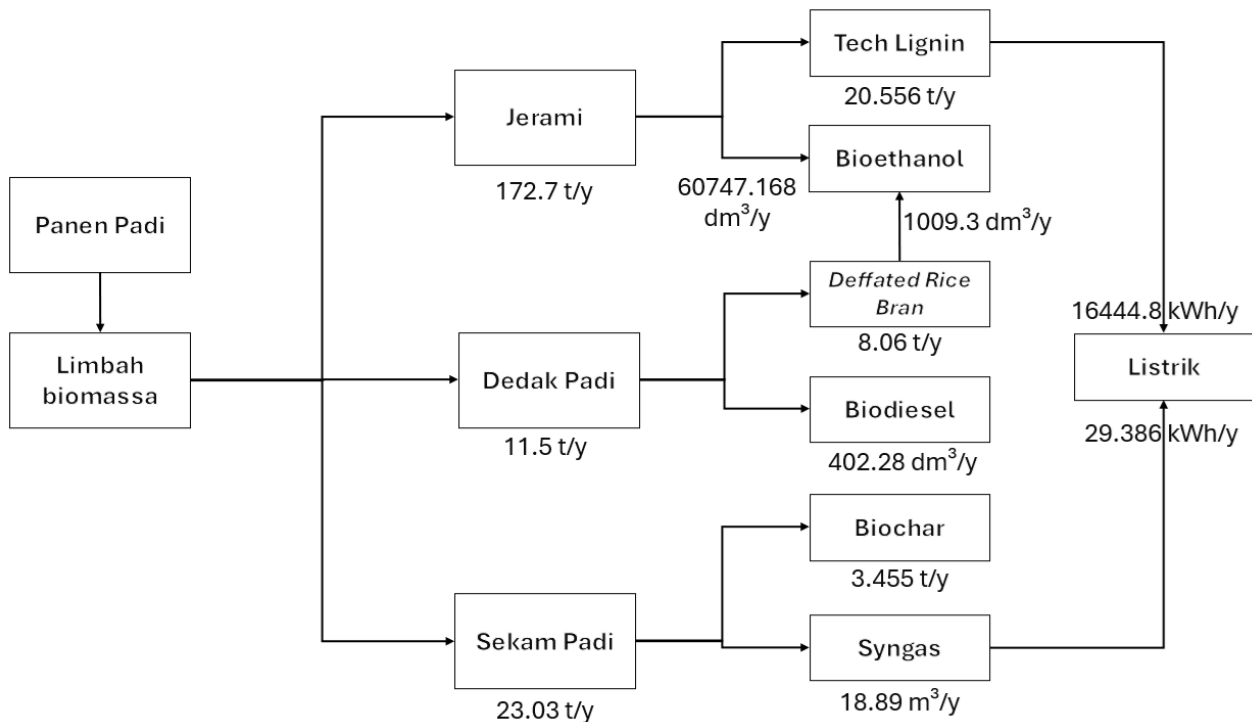
Hasil identifikasi raw material dilanjutkan dengan analisis rasio aliran yang juga menjadi acuan neraca massa proses. Rasio-rasio aliran diperoleh dari beberapa literatur. Neraca massa proses biorefineri dengan asumsi konversi limbah menjadi beberapa produk dapat digambarkan sebagai berikut:

- Berdasarkan Zhao et al (2024) 1 kg jerami padi yang diproses dengan pretreatment dan hidrolisis dapat menghasilkan 302.8 g bioethanol dan 119.0 g *technical lignin* yang merupakan limbah hasil delignifikasi
- Menurut Alexandri et al (2020), biodiesel dapat diperoleh dari rice bran atau dedak sebanyak 78-85% dari berat total bahan baku. Pada proses gasifikasi juga menghasilkan 15-20% DRB (Defated Rice Bran) yang juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku tambahan untuk proses fermentasi bioethanol.
- Berdasarkan Sanusi et al (2022) dan Arifin et al (2012) pada proses gasifikasi dapat menghasilkan syngas sekitar 70-80% dari massa awal sekam padi. Komposisi syngas terdiri dari Karbon monoksida (CO), Hidrogen (H₂), Metana (CH₄), dan Karbon dioksida (CO₂), kemudian, produk syngas ini dapat dikonversi lebih lanjut menjadi listrik dengan gas turbine. Pada proses gasifikasi akan menghasilkan residu berupa biochar sekitar 15-25% dari massa awal sekam padi yang dapat digunakan sebagai bahan bakar padat dan pupuk organik.

Asumsi-asumsi tersebut dijadikan dasar rasio aliran untuk membangun model *p-graph* dan analisis neraca massa dan *p-graph* untuk desain biorefineri yang optimal. Analisis neraca massa dilakukan dengan meninjau setiap proses unit yang terlibat.

3. Membangun model *p-graph* berdasarkan data dan parameter untuk membangun model diagram *superstructure*

Asumsi-asumsi tersebut dilakukan diperoleh menginput proses aliran yang diberikan. Input-input nilai yang dimasukkan ke dalam sistem alir sehingga dapat diperoleh diagram *superstructure*



Gambar 1. Alur Proses Biorefineri Limbah Biomassa dari Padi

4. Mengoptimalkan aliran material dan energi untuk memaksimalkan output yang diinginkan (Byun & Han, 2020).

Optimalisasi dilakukan dengan melakukan *running* program dari alur *superstructure* yang dibangun pada sistem. Kemudian, hasil solusi optimal dan maksimal akan muncul pada *software* PNS (*Proses Network Synthesis*)

Dengan *p-graph*, dapat diketahui konfigurasi optimal dari sistem untuk menghasilkan produk yang diinginkan dengan biaya minimal dan ramah lingkungan (Friedler et al, 2019).

2.2 Analisis Tekno-Ekonomi

Setelah pemodelan *p-graph*, analisis tekno-ekonomi dilakukan untuk menghitung kinerja ekonomi dari proses pra-rancangan produksi bioenergi dari limbah biomassa pertanian padi. Dalam menentukan kelayakan proses produksi secara ekonomi digunakan beberapa parameter ekonomi, yaitu *Net Present Value* (NPV), *Payback Period* (PP), *Break Event Point* (BEP), dan MARR (*Minimum Attractive Rate of Return*). Asumsi yang digunakan pada analisis ekonomi ini adalah sebagai berikut

1. Sumber bahan baku biomassa limbah padi berasal dari seluruh petani di Kabupaten Sleman yang dikumpulkan dan dikelola di satu lokasi, kemudian dilakukan *profit sharing* dengan petani sebesar 30% pendapatan dari hasil penjualan produk (*revenue*)
2. Nilai tukar Rupiah terhadap Dolar Amerika diasumsikan konstan, yaitu Rp 16.188,65 per tanggal 23 Desember 2024 (Bank Indonesia, 2024)
3. Nilai depresiasi ditetapkan sebesar 10%/tahun secara linear dengan masa pakai alat unit operasi diasumsikan sebesar 10 tahun.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis Neraca Massa Proses

Berdasarkan data Badan Pusat Statistik, produksi padi di Kabupaten Sleman dianalisis dari luas panen padi dengan produktivitas yang dihasilkan pada tahun 2023 (tabel 1.1) sehingga mencapai 115.162 ton (BPS, 2023). Dari hasil produktivitas tersebut dapat diperoleh berat biomassa limbah yang dihasilkan. Asumsi rasio jerami dan sekam terhadap produksi padi masing-masing adalah 1:1.5 dan 1:0.2, potensi limbah jerami padi dan sekam padi yang dapat dihasilkan adalah sebesar 172.743 ton dan 23.032 ton (Mutmainnah et al., 2022; IRRI, 2024). Limbah padi ini dapat dijadikan bahan baku dalam proses biorefineri untuk menghasilkan produk bernilai tambah seperti bioenergi, biofertilizer, dan bahan bakar padat. Namun, pada penelitian ini berfokus pada konversi limbah padi menjadi bioetanol, biodiesel, dan biochar.

Tabel 1. Produktivitas padi di Kabupaten Sleman dari tahun 2023 (BPS Sleman, 2023)

Luas panen padi (Ha)	Produktivitas Padi (kuintal/Ha)
22.824	50.46

Analisis karakteristik biomassa limbah produksi padi juga menjadi hal penting untuk menentukan potensi konversi dan skenario Biorefineri yang optimal (tabel 2). Karakteristik ini ditinjau sebagai input untuk konversi limbah menjadi energi, seperti lignin, selulosa, dan hemiselulosa yang menjadi komponen penting untuk proses konversi menjadi bioethanol.

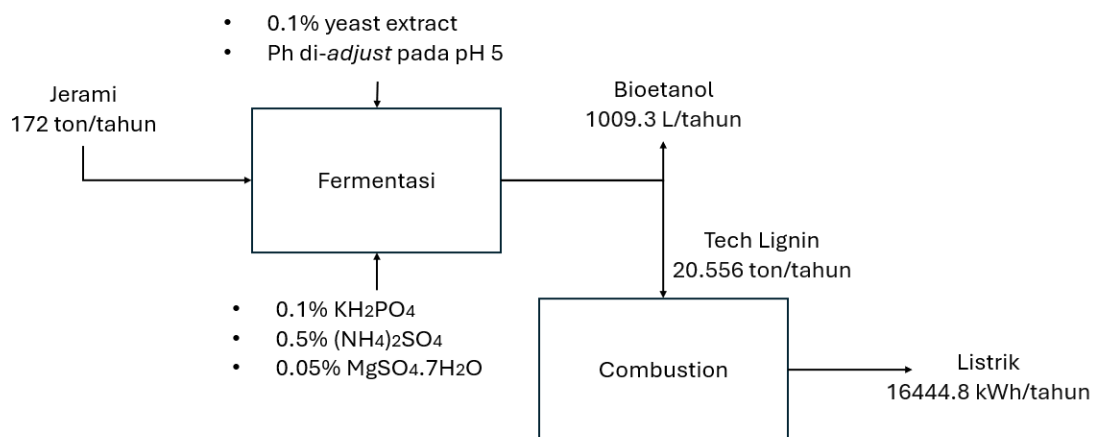
Tabel 2. karakteristik biomassa limbah produksi padi

Karakterisasi	Komposisi (%)		
	Lignin	Selulosa	Hemiselulosa
Jerami Padi	19.41 ^a	3.32 ^a	30.51 ^a
Sekam Padi	20.9 ^b	58.85 ^b	18.03 ^b
Dedak Padi	3.9 ^c	9.8 ^c	20.6 ^c

Sumber: ^a(Chen et al, 2020) ^b(Matin and Hadiyanto, 2017) ^c(Alexandri et al, 2020)

Dari hasil karakteristik tersebut dijadikan dasar analisis neraca massa proses produksi limbah biomassa menjadi produk energi terbarukan. Neraca massa mrepresentasi visual dari aliran massa dalam suatu sistem, yang menunjukkan bagaimana massa masuk, keluar, dan berubah bentuk dalam proses tertentu.

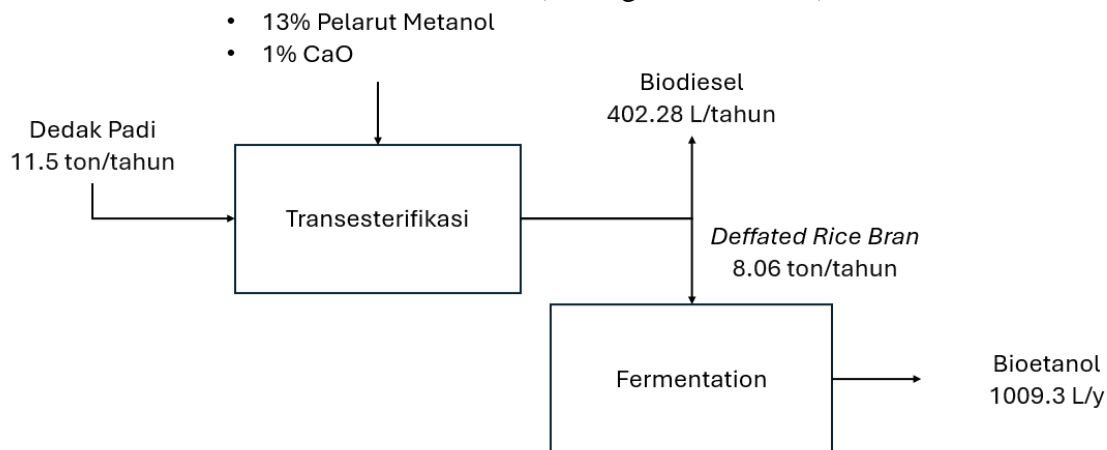
Pada neraca massa yang pertama, jerami dimasukkan ke dalam proses fermentasi dengan laju 172 ton/tahun. Jerami merupakan sumber biomassa lignoselulosa yang digunakan untuk menghasilkan bioetanol melalui proses biokimia. Beberapa senyawa tambahan dimasukkan untuk mendukung proses fermentasi, termasuk yeast Extract (0.1%) sebagai inokulum proses fermentasi sebagai sumber nutrisi untuk mikroorganismeserta medium untuk nutrisi, buffer, dan kofaktor enzim, yaitu KH_2PO_4 (0.1%) $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (0.5%) dan $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.05%) (Belal, 2013). Kemudian, pH proses diatur ke pH 5, kondisi optimal untuk aktivitas enzim dan fermentasi mikroba (Raina et al, 2020).



Gambar 2. Neraca Masa Proses Fermentasi dan *Combustion* Limbah Jerami

Pada output, bioetanol dihasilkan sebanyak 1009.3 L/tahun dihasilkan sebagai produk utama dari fermentasi serta produk samping technical lignin sebanyak 20.556 ton/tahun. Pada proses fermentasi, fermentasi jerami dibantu enzim lignolytik, hemiselulase, dan selulase pada mikroba yang menghidrolisis komponen selulosa menjadi gula sederhana yang kemudian difermentasi menjadi bioetanol (Aziz et al, 2023). Suplemen nutrisi dan pengaturan pH membantu menciptakan kondisi optimal untuk mikroba fermentasi. Produk samping lignin merupakan residu yang tidak dapat difermentasi, tetapi memiliki potensi sebagai bahan baku untuk energi atau industri kimia lainnya. Lignin merupakan komponen yang tidak terfermentasi dari jerami, yang bisa dimanfaatkan untuk produk lain seperti bahan bakar atau material biomassa (Zhao et al, 2024).

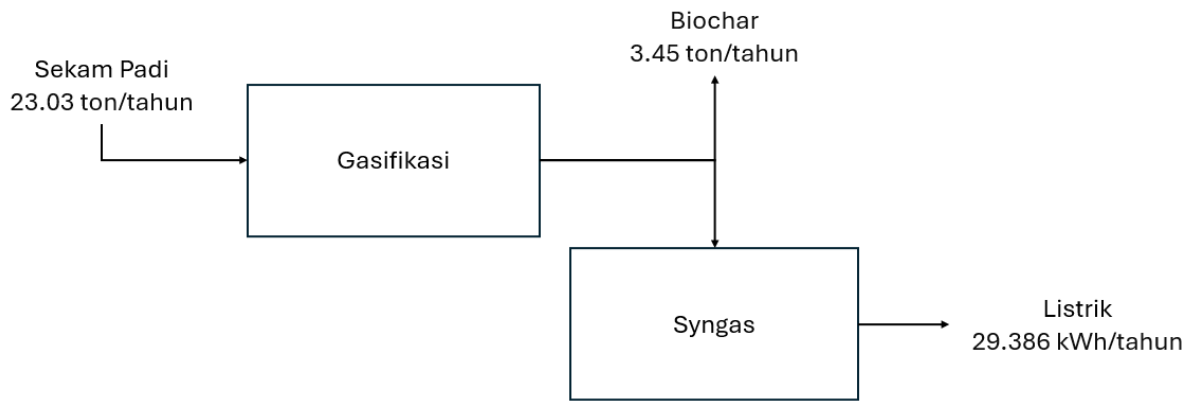
Proses fermentasi ini menunjukkan konversi sebagian besar jerami menjadi bioetanol dan produk samping lignin. Hasil bioetanol dan lignin menunjukkan bagaimana efisiensi bahan baku diubah menjadi produk bernilai tinggi. Sisa biomassa berupa lignin dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk unit *combustion* yang terkonversi menjadi energi listrik. *Unit combustion* ini melibatkan proses *pre-treatment*, seperti memperkecil ukuran, kemudian terapat sistem kontrol di boiler dan turbin untuk merubah energi panas pada proses pembakaran menjadi listrik (gambar 2). Lignin teknis, residu dari pretreatment, sering kali digunakan sebagai bahan bakar pembakaran langsung (*combustion*). Lignin memiliki nilai kalor yang tinggi (HHV sekitar 25-27 MJ/kg), menjadikannya bahan bakar ideal untuk pembangkitan listrik dalam sistem kogenerasi. Sebuah studi menunjukkan bahwa lignin dapat digunakan untuk menghasilkan listrik melalui pembakaran, dengan hasil efisiensi tinggi pada reaktor termal, sambil meminimalkan limbah (Bazargan et al., 2015).



Gambar 3. Neraca Masa Proses Transesterifikasi Limbah Dedak Padi

Analisis selanjutnya adalah neraca massa proses pemanfaatan dedak padi sebesar 11,5 ton/tahun melalui dua tahap proses utama, yaitu transesterifikasi dan fermentasi, untuk menghasilkan biodiesel dan bioetanol (gambar 3). Pada tahap transesterifikasi, dedak padi diolah dengan bantuan 13% pelarut metanol dan 1% katalis CaO, menghasilkan biodiesel sebanyak 402,28 liter/tahun. Proses ini mengubah trigliserida dalam minyak dedak padi menjadi metil ester (biodiesel) menggunakan reaksi kimia yang dibantu oleh katalis basa heterogen (CaO) (Oko et al, 2020). Produk sampingan berupa *defatted rice bran* sebanyak 8,06 ton/tahun juga dihasilkan, yang merupakan residu biomassa kaya serat dan nutrisi (Alexandri et al, 2020).

Tahap fermentasi memanfaatkan *defatted rice bran* untuk menghasilkan 1009,3 liter/tahun bioetanol, sebuah bioenergi cair yang ramah lingkungan. Fermentasi dilakukan dengan memanfaatkan mikroorganisme untuk mengubah komponen selulosa dalam residu menjadi etanol (De Medeiros et al, 2017). Proses ini mencerminkan efisiensi dalam memanfaatkan limbah biomassa dari tahap transesterifikasi untuk menghasilkan produk energi tambahan. Dengan menghasilkan biodiesel dan bioetanol secara terpadu, proses ini menunjukkan berkelanjutan dalam memanfaatkan limbah agrikultur seperti dedak padi, sekaligus mengurangi emisi karbon melalui penggunaan bahan bakar terbarukan.



Gambar 4. Neraca Masa Proses Gasifikasi Limbah Sekam Padi

Selanjutnya, neraca massa proses gasifikasi sekam padi dengan input sebesar 23,03 ton/tahun dapat menghasilkan energi dan produk sampingan bernilai ekonomis (gambar 4). Proses gasifikasi adalah metode termokimia yang mengubah biomassa menjadi syngas (gas sintesis), sebuah campuran gas yang kaya akan karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), dan metana (CH₄) (Huang et al, 2020). Dari proses ini, syngas kemudian digunakan untuk menghasilkan listrik sebanyak 29.386 kWh/tahun. Selain itu, gasifikasi juga menghasilkan produk sampingan berupa biochar sebanyak 3,45 ton/tahun, yang dapat digunakan sebagai amandemen tanah, penyerap karbon, atau bahan bakar padat.

Gasifikasi sekam padi ini mencerminkan pendekatan yang efisien dalam memanfaatkan limbah agrikultur untuk menghasilkan energi terbarukan. Proses ini tidak hanya mengurangi emisi karbon dari pembakaran langsung biomassa tetapi juga menghasilkan biochar, yang merupakan produk dengan nilai tambah yang dapat meningkatkan kualitas tanah dan membantu mitigasi perubahan iklim (Linam et al, 2023). Dengan demikian, integrasi antara produksi energi (syngas) dan pemanfaatan biochar mendukung prinsip ekonomi sirkular, di mana limbah biomassa seperti sekam padi diubah menjadi produk yang mendukung keberlanjutan energi dan lingkungan.

Selanjutnya, alur pilihan lain adalah sekam padi. Sekam padi dikonversi menjadi syngas sebanyak 19,575 m³/tahun dan biochar sebanyak 3,455 ton/tahun melalui gasifikasi. Penelitian lain menemukan bahwa gasifikasi sekam padi pada suhu tinggi menghasilkan energi efisien, dengan pengaruh suhu sangat signifikan terhadap produk syngas (Bakari et al., 2020). Nilai kalor untuk bahan baku juga menjadi faktor utama dalam proses konversi menjadi syngas. Nilai kalor untuk sekam padi adalah LHV 13.84 MJ/kg (Huang et al, 2020). Nilai kalor ini menjadi nilai penting karena memengaruhi efisiensi konversi energi dan kualitas produk gas yang dihasilkan. Bahan baku dengan LHV tinggi menghasilkan lebih banyak energi yang dapat digunakan, meningkatkan efisiensi energi proses. Misalnya, penelitian menunjukkan bahwa rasio biomassa terhadap udara yang optimal dapat menghasilkan efisiensi energi tinggi dengan LHV yang stabil (Sreejith et al., 2013). Biomassa dengan LHV tinggi memudahkan pengoperasian reaktor dengan konsumsi energi yang lebih rendah dan menghasilkan gasifikasi yang lebih stabil (Das & Roy, 2021). Bahan baku dengan LHV rendah cenderung menghasilkan lebih banyak residu tar dan abu, yang memerlukan pengolahan tambahan dan meningkatkan jejak lingkungan sehingga meningkatkan emisi CO₂ (Niu et al., 2019). Selanjutnya, biochar yang dihasilkan dapat digunakan sebagai amandemen tanah atau penyerap karbon. Integrasi gasifikasi dalam rantai energi lokal juga memungkinkan pengurangan ketergantungan pada bahan bakar fosil (Diehlmann et al., 2019). Setiap unit teknologi menunjukkan peran yang jelas dalam menghasilkan bioenergi.

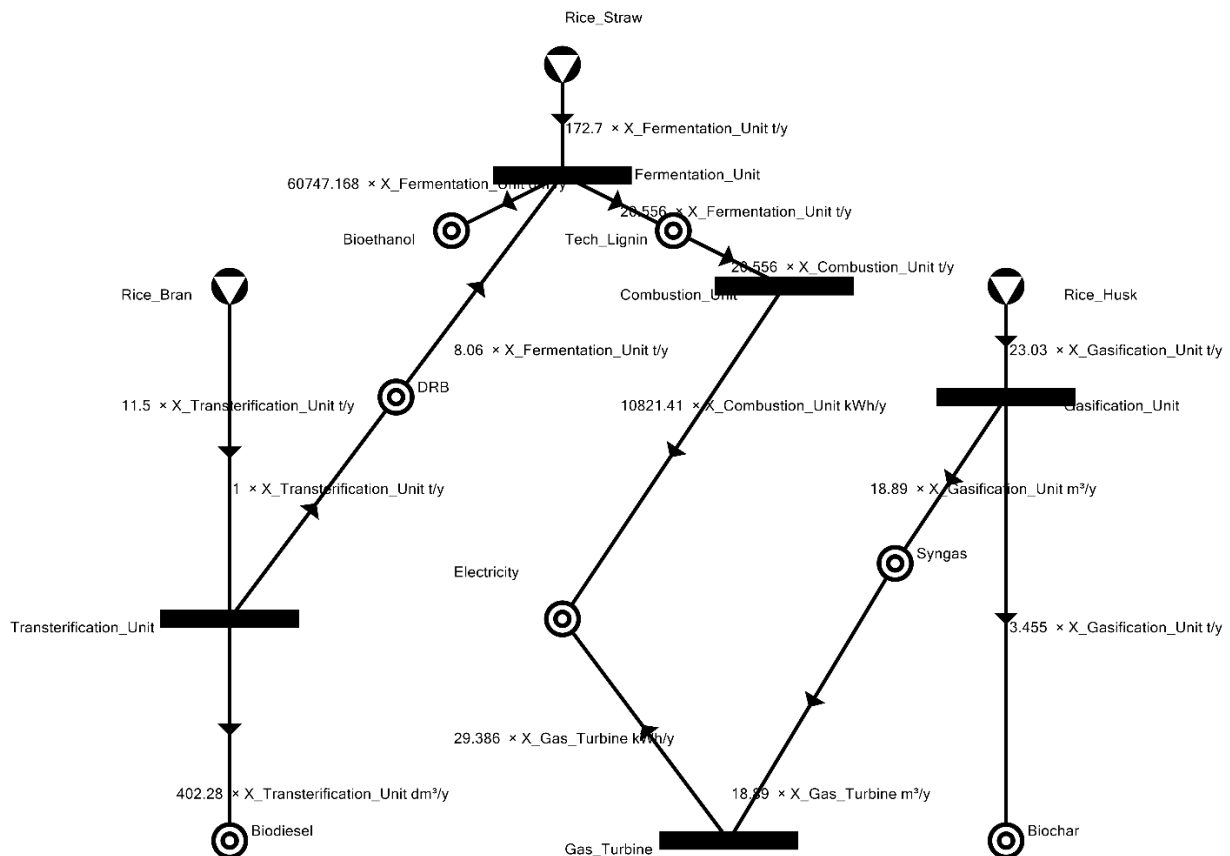
3.2 Analisis Solusi Optimal Melalui dengan *P-Graph*

Salah satu pilar utama rekayasa adalah desain proses konseptual, yang berkaitan dengan definisi, simulasi, optimasi, dan pengendalian proses kimia. Desain ini melibatkan integrasi blok unit yang lebih sederhana, yang ditandai oleh sifat fisik dan kimia (Mencarelli et al, 2020). Desain yang terintegrasi perlu dilakukan perancangan rantai proses. Perancangan rantai alur proses Biorefineri pada limbah padi di Kabupaten Sleman dilakukan dengan menggunakan pemodelan *p-graph* (gambar 4). Analisis *p-graph* memungkinkan optimasi pemanfaatan berbagai jenis biomassa menjadi produk

yang beragam, baik energi, bahan kimia, ataupun bahan baku lain. Melalui pemodelan *p-graph*, diperoleh skenario optimal untuk mengkonversi limbah padi menjadi bioetanol, biodiesel, dan biochar. Simulasi *p-graph* diawali dengan menginput nilai-nilai raw material limbah padi. Berdasarkan asumsi-asumsi dan analisis neraca massa yang dilakukan input bahan baru terdapat, jerami sebanyak 172.743 ton, sekam padi 23.032 ton, dan 11.5 ton dedak padi setiap tahunnya. Pada model *p-graph*, unit-unit proses yang ditambahkan adalah fermentasi, combustion, transesterifikasi, dan gasifikasi. Dasar pemilihan unit-unit tersebut adalah memperoleh produk bioenergi yang beragam, seperti bioetanol, biodiesel, dan biochar serta mudah diaplikasikan di kawasan Asia Tenggara khususnya, Kabupaten Sleman (Benjamin et al, 2021).

Alur superstructure (gambar 1) menunjukkan aliran material dan energi dalam sistem pengolahan biomassa yang lebih terstruktur. Jerami padi, dedak padi, dan sekam padi digunakan sebagai bahan baku utama untuk menghasilkan produk bioenergi seperti bioetanol, biodiesel, syngas, biochar, dan listrik. Sistem ini memanfaatkan unit-unit teknologi seperti fermentasi, gasifikasi, pembakaran, dan transesterifikasi, dengan jumlah aliran material dan energi yang spesifik untuk setiap jalur. Pada alur superstructure ini memberikan banyak pilihan alur dalam efisiensi integrasi aliran material yang memanfaatkan produk sampingan dari satu proses sebagai input untuk proses lainnya, menciptakan pendekatan ekonomi sirkular.

Aliran material yang terintegrasi ini menunjukkan potensi pengolahan limbah hasil pertanian menjadi bioenergi dapat meningkatkan nilai tambah limbah dan mendukung keberlanjutan energi. Namun, untuk meningkatkan efisiensi sistem perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut terhadap efisiensi masing-masing unit teknologi, biaya operasional, dan dampak lingkungan. Penelitian lebih dalam juga diperlukan untuk mengintegrasikan teknologi ini dengan jaringan energi lokal, sehingga output energi seperti listrik dan biofuel dapat dimanfaatkan secara maksimal. Pendekatan ini dapat menjadi model bagi negara agraris lain untuk memanfaatkan limbah hasil pertanian secara optimal.



Gambar 5. Diagram superstructure *p-graph* pada PNS

Pada software diagram superstructure diselesaikan dengan melakukan *running* software untuk mendapatkan solusi optimal yang dapat memberikan keuntungan satu kali *running* (gambar 5). Satuan-satuan operasi diinputkan dengan pendekatan produksi pertahun. Pada pemodelan ini, nilai-

nilai *flow rate* juga disesuaikan berdasarkan hasil perhitungan neraca masa yang sudah disusun untuk aliran material ke unit-unit operasi yang terintegrasi sebelumnya. Selain itu, nilai-nilai investasi dan operasional untuk unit-unit operasi serta harga bahan baku dan produk dimasukkan kedalam model superstructure (tabel 3). Harga-harga investasi ini diperoleh dari mencari data di website penjualan unit proses dan melakukan pendekatan dari beberapa jurnal (alibaba.com) yang kemudian disesuaikan dengan kapasitas dan aliran maksimal. Harga bahan baku jerami diperoleh dari hasil wawancara petani yang menjual beberapa ke pihak tertentu untuk dijadikan bahan penelitian karena sebagian besar limbah biomassa padi akan dibuang atau dibakar oleh petani (tabel 4).

Tabel 3. Investasi alat

Alat	Investasi	Kapasitas
Unit Fermentasi	Rp 67.244.000	50 kg/jam
Unit Transesterifikasi	Rp 50.433.000	10 kg/jam
Unit Gasifikasi	Rp 134.488.000	10 L/jam
Unit Combustion	Rp 33.622.000	50 kg/jam
Gas Turbine	Rp 252.165.000	5L/jam
Total	Rp 537.952.000	

Sumber: Yokayama & Matsumura (2008); alibaba.com; indotrading.org

Tabel 4. Harga bahan baku dan produk

Bahan baku		Sumber
Jerami	Rp 1.000.000/ton	Wawancara lapangan
Sekam padi	Rp 1.000.000/ton	Wawancara lapangan
Dedak padi	Rp 1.000.000/ton	Wawancara lapangan
Produk	Harga/unit	Sumber
Bioetanol	Rp 14.114/L	ESDM, 2024
Biodiesel	Rp 12.633/L	ESDM, 2024
Biochar	Rp 20.000.000/ton	Elias et al, 2022

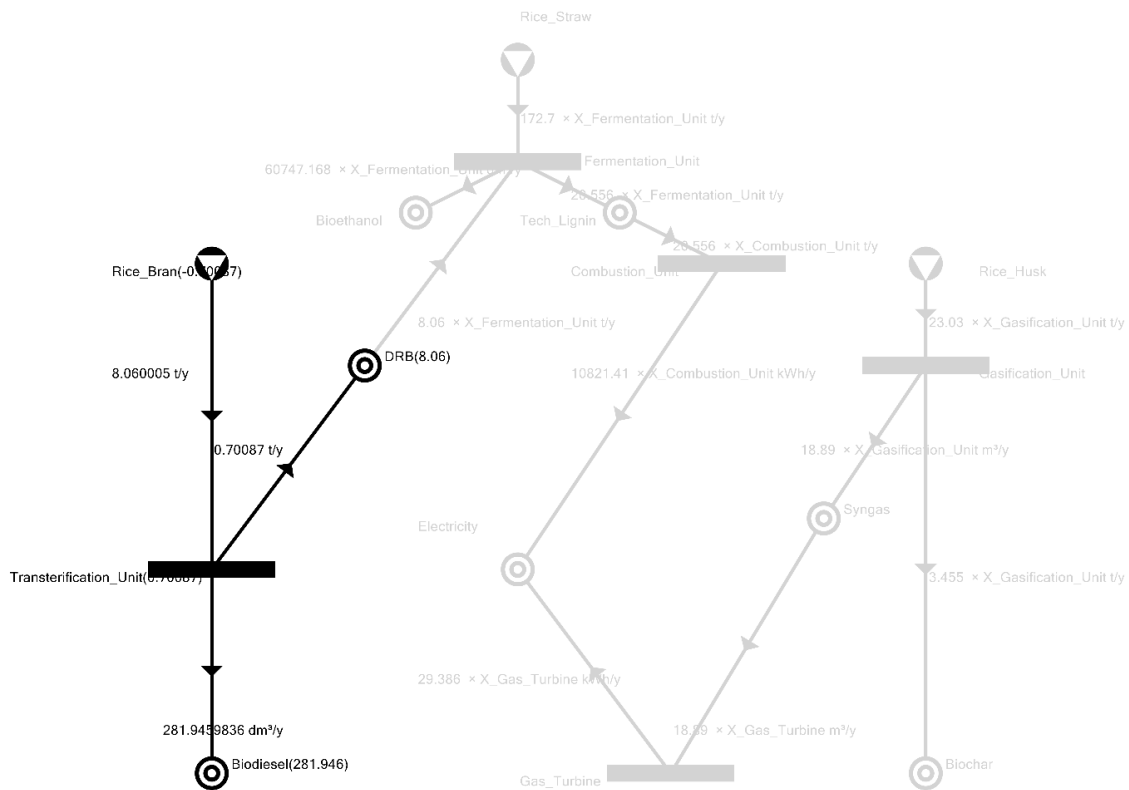
Tabel 5. Harga total bahan baku dan produk

Bahan baku		
	Produksi	Harga total
Jerami	172.743 ton/tahun	Rp 172.743.000
Sekam padi	23.0324 ton/tahun	Rp 23.032.400
Dedak padi	11.5162 ton/tahun	Rp 11.516.200
Total		Rp 207.291.600
Produk		
	Produksi	Harga total
Bioetanol	60747.168 L/tahun	Rp 850.460.352
Biodiesel+ongkos angkut	402.28 L/tahun	Rp 6.034.200
Biochar	3.455 ton/tahun	Rp 69.100.000
Total		Rp 925.594.552

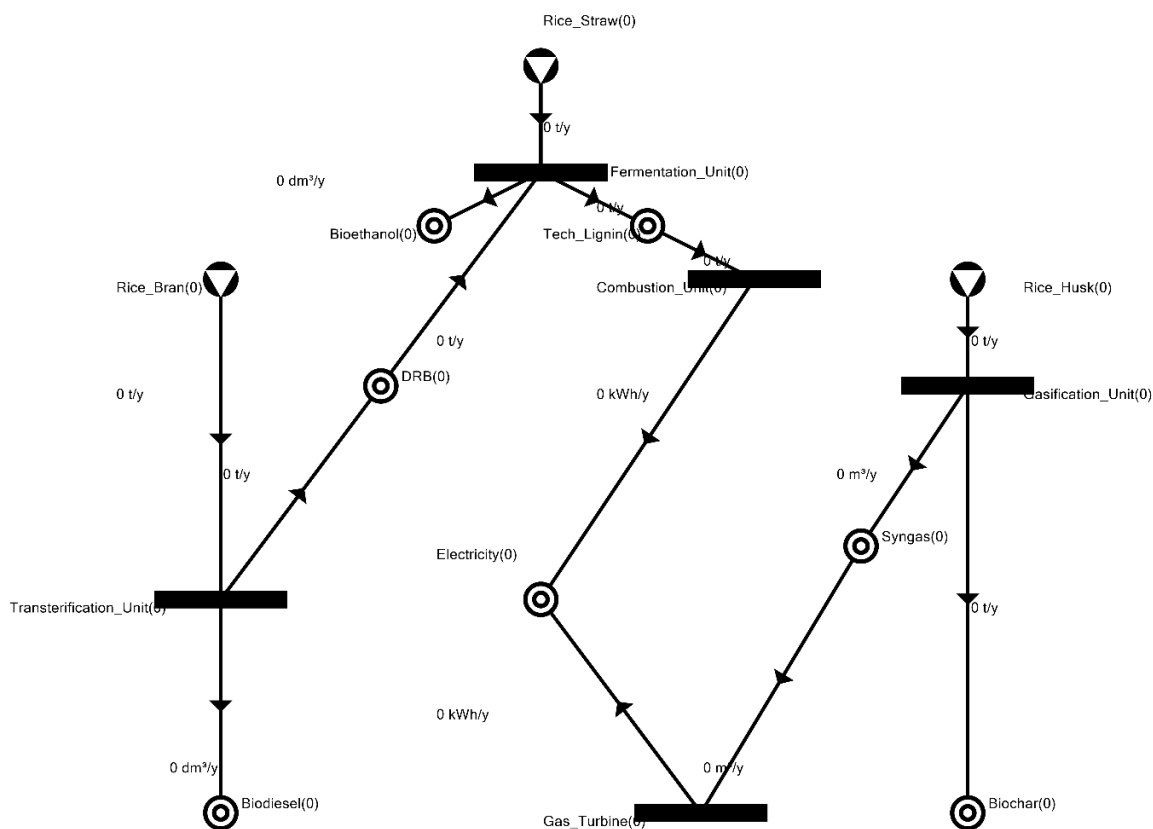
Setelah dilakukan *running*, hasil pemodelan memberikan dia hasil, yaitu hasil solusi optimal dan solusi maksimal. Solusi optimal yang dihasilkan adalah alur untuk proses produksi dedak padi pada unit transesterifikasi yang menghasilkan biodiesel. Dalam sistem ini, dedak padi sebanyak 8,06 ton per tahun diproses, menghasilkan 281,946 dm³ biodiesel per tahun. Selain itu, terdapat produk sampingan berupa Dedak *Rice Bran* (DRB) sebanyak 8,06 ton per tahun. Diagram ini menunjukkan jalur material yang sederhana dan efisien, berfokus pada optimalisasi dedak padi sebagai sumber energi terbarukan melalui reaksi kimia berbasis katalis. Proses transesterifikasi memanfaatkan kandungan minyak dalam dedak padi untuk konversi menjadi biodiesel. Berdasarkan literatur, katalis alkali seperti KOH atau NaOH sering digunakan untuk mempercepat reaksi transesterifikasi, yang

memerlukan suhu sekitar 50-60°C untuk efisiensi tinggi (Kumar et al., 2011; Hossain, 2015). Produk biodiesel ini memiliki nilai tambah sebagai bahan bakar bersih, sementara DRB sebanyak 0.7 ton per tahun dapat dimanfaatkan untuk pakan ternak atau sumber energi lain (Alexandri et al, 2020).

Solusi optimal ini dapat diimplementasikan jika memang fokus untuk menghasilkan produk hanya di biodiesel, sedangkan limbah-limbah biomassa yang lain dapat digunakan untuk unit yang operasional-nya lebih murah namun menguntungkan, seperti combustion untuk menghasilkan Listrik (gambar 6). Proses combustion dapat dikolektif bersama dengan sampah-sampah domestic yang memiliki nilai HHV tinggi. HHV adalah parameter kunci untuk menentukan jumlah total energi yang dilepaskan selama pembakaran bahan bakar, termasuk energi yang terkandung dalam uap air yang terbentuk selama proses pembakaran (Bhaskar et al., 2011). Lignin residu dari biomassa memiliki HHV hingga 27 MJ/kg, membuatnya ideal untuk sistem kogenerasi listrik dan panas, menghasilkan hingga 5981 kWh listrik per ton biomassa (Liu & Bao, 2017). Namun, kandungan kelembaban tinggi pada biomassa sering mengurangi HHV dan meningkatkan kebutuhan energi untuk pengeringan (Bhaskar et al., 2011).



Gambar 6. Skema solusi optimal hasil *running* p-graph



Gambar 7. Skema solusi maksimal hasil *running p-graph*

Solusi yang berikutnya adalah solusi maksimal aliran yang menunjukkan keseluruhan proses (gambar 7). Solusi ini tidak optimal karena tidak dapat memberikan nilai-nilai rate dan keuntungan yang pasti. Hal ini terjadi karena kemungkinan *flow rate* yang diberikan masih belum optimal dalam memproses model karena parameter yang diambil berdasarkan literatur yang kondisinya tidak spesifik di Kabupaten Sleman sehingga perlu adanya tinjauan lebih dalam terkait pelaksanaan di lapangan. Maka dari itu, perlu dilakukan penelitian skala laboratorium atau skala pilot terlebih dahulu untuk mendapatkan nilai-nilai pasti yang disesuaikan dengan kondisi di Kabupaten Sleman. Namun, solusi maksimal ini masih dapat dianalisis tekno-ekonominya sebagai langkah awal inisiasi prarancangan proses produksi bioenergi yang terintegrasi dengan pendekatan konsep Biorefineri. Solusi ini juga masih bisa diimplementasikan jika input bahan baku dan permintaan tinggi (Sangalang et al, 2021).

3.3 Analisis Ekonomi Teknik Pengolahan Limbah untuk Alur Superstructure

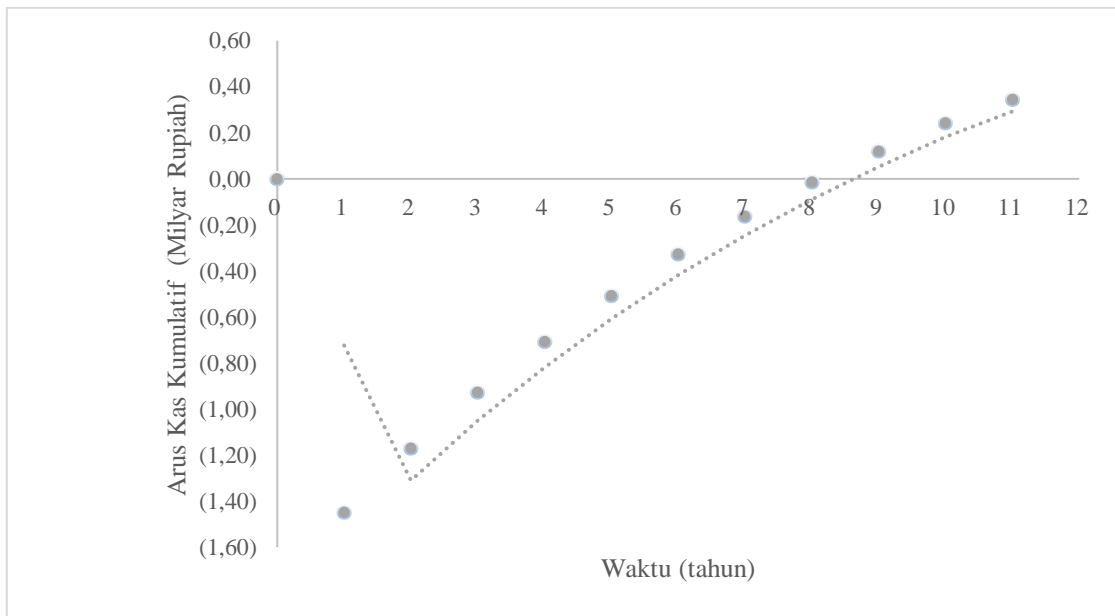
Secara keekonomian, skema solusi optimal yang berfokus pada trasesterifikasi memberikan pendapatan keuntungan 9000 USD/tahun. Nilai ini muncul pada *running p-graph* di PNS. Nilai ini menunjukkan profit yang tidak terlalu besar dan menguntungkan jika diimplementasikan secara konsisten. Realisasi pengadaan juga dapat dilakukan secara fleksibel dan kondisi tertentu. Selain itu, analisis ekonomi juga dilakukan untuk solusi maksimal. Solusi maksimal memberikan pendekatan Biorefineri karena turunan produk yang cukup banyak. Meskipun bukan merupakan solusi optimal, solusi ini dapat ditinjau analisis ekonominya lebih mendalam karena dapat menjadi sebuah prarancangan proses produksi yang terintegrasi untuk mencapai keberlanjutan.

Dari arus kas kumulatif selama 10 tahun ini, investasi awal akan memasuki *payback periode* pada tahun ke- 9 (Gambar 8). NPV pada tingkat pengembalian nol setara dengan IRR (Internal Rate-of-Return) adalah indikator kunci untuk mengukur profitabilitas investasi. Jika IRR lebih besar dari MARR, investasi dianggap ekonomis dan layak. Jika IRR kurang dari MARR, investasi tidak menguntungkan (Basnet, 2021). Investasi awal akan kembali seluruhnya pada tahun ke-8. *Payback period* diperoleh sejak investasi dilakukan. Kemudian, nilai IRR diperoleh sebesar 21.7%, sedangkan MARR (*Minimum Attractive Rate of Return*) 15%. Nilai tersebut menunjukkan investasi layak untuk

mendapatkan pendanaan yang mana nilai IRR lebih besar dibandingkan nilai MARR. Hal ini menunjukkan bahwa proses produksi potensi untuk menghasilkan keuntungan ekonomi yang lebih besar dari tingkat pengembalian minimum yang dapat diterima (Asrawi & Noueihed, 2017).

Tabel 6. Total Capital Investment untuk Pra-rancangan Konversi Limbah Biomassa Padi

Direct cost (DC)	Biaya (Rp)
Biaya total Peralatan/Equipment (E)	Rp 537.952.000
Kontrol dan instrumentasi (0,02 FCI)	Rp 23.191.948
Sistem distribusi listrik (0,01 E)	Rp 5.379.520
Instalasi peralatan (0,2 E)	Rp 107.590.400
Lahan (beli)	Rp 125.000.000
Bangunan (beli) (0,05 FCI)	Rp 57.979.871
Total DC	Rp 857.093.739
Indirect cost (IC)	Biaya (Rp)
Teknis dan supervisi (0,15 DC)	Rp 128.564.061
Biaya tak terduga (0,15 FCI)	Rp 173.939.612
Total IC	Rp 302.503.673
Fixed Capital Investment (FCI)	Biaya (Rp)
FCI = DC + IC	Rp 1.159.597.411
Work Capital Investment (0,2 TCI)	Rp 289.899.353
Total Capital Investment (TCI)	Biaya (Rp)
TCI = WCI + FCI	Rp 1.449.496.764



Gambar 8. Grafik Arus Kas Total Pembiayaan Untuk solusi Maksimal Pemanfaatan Limbah

3.4 Analisis Dampak Lingkungan dan Sosial Pengolahan Limbah Biomassa

Dampak lingkungan pada pemanfaatan limbah biomassa menjadi energi terbarukan akan menunjukkan perbedaan yang signifikan dibandingkan sumber energi konvensional. Pada penelitian ini, limbah biomassa dari hasil panen padi menjadi salah satu isu lingkungan di sektor pertanian yang masih belum ditindak lanjutin dengan baik. Pemanfaatan limbah hasil pertanian ini pasti akan memberikan kontribusi positif dalam mengurangi dampak lingkungan dari limbah pertanian. Sehingga, analisis lingkungan ini ditinjau lebih dalam untuk dengan melakukan perbandingan dari beberapa studi kasus yang sudah memanfaatkan limbah biomassa sebagai energi terbarukan.

Pemanfaatan limbah jerami padi yang dikonversi menjadi bioetanol dan limbah sisa fermentasi digunakan untuk pembakaran (*combustion*) dalam menghasilkan Listrik. Proses konversi jerami padi menjadi bioetanol secara signifikan mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Penelitian menunjukkan bahwa bioetanol dari jerami padi memiliki jejak karbon yang lebih rendah karena memanfaatkan limbah hasil pertanian yang melimpah sebagai bahan baku (Saga et al., 2010). Selain itu, pembakaran lignin sisa fermentasi menghasilkan listrik yang karbon-netral karena emisi karbon yang dihasilkan telah diserap oleh tanaman selama siklus hidupnya. Lignin teknis, yang merupakan limbah sisa fermentasi, memiliki nilai kalor tinggi (sekitar 25–27 MJ/kg) sehingga sangat cocok untuk pembakaran dan menghasilkan listrik. Kombinasi bioetanol dan lignin untuk kogenerasi listrik dapat menghasilkan hingga 9420 kWh listrik per hektar sawah yang dikelola (Saga et al., 2010). Proses ini tidak hanya memanfaatkan limbah secara efisien tetapi juga mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Dibandingkan dengan pembangkit listrik berbahan bakar fosil, pembangkit listrik berbasis biomassa dari sekam padi memiliki jejak karbon yang lebih rendah dan menghasilkan emisi nitrogen oksida (NO_x) dan sulfur oksida (SO_x) yang lebih sedikit (Chungsangunsit et al., 2009). Selain itu, pemanfaatan sekam padi dan lignin sisa fermentasi mengurangi volume limbah hasil pertanian yang biasanya dibakar secara terbuka, mengurangi polusi udara.

Pemanfaatan sekam padi pada proses gasifikasi menghasilkan syngas dengan nilai kalor tinggi (HHV) yang dapat digunakan sebagai sumber listrik lokal. Sebagai contoh, sebuah studi menunjukkan bahwa gasifikasi sekam padi menghasilkan listrik dengan emisi karbon 30-40% lebih rendah dibandingkan bahan bakar fosil (Yang et al., 2016). Hasil proses gasifikasi akan menghasilkan produk samping, biochar. Biochar memiliki manfaat besar dalam memperbaiki kualitas tanah. Biochar membantu meningkatkan kapasitas tukar kation, retensi air, dan kandungan karbon organik tanah. Sebuah studi menemukan bahwa biochar dari sekam padi meningkatkan kesuburan tanah dengan menstabilkan karbon, yang membantu mitigasi perubahan iklim melalui penyerapan karbon jangka panjang (Nguyen et al., 2015).

Produksi biodiesel dari dedak padi memiliki dampak positif dalam mengurangi emisi karbon. Biodiesel dianggap sebagai bahan bakar netral karbon karena CO₂ yang dilepaskan selama pembakaran diserap kembali oleh tanaman selama proses fotosintesis. Penggunaan dedak padi untuk biodiesel dapat memenuhi 60-70% kebutuhan solar nasional, yang secara langsung akan mengurangi pembakaran bahan bakar fosil dan emisi gas rumah kaca (Hasan et al. 2014). Berdasarkan (Xu et al, 2022) , biodiesel dari bahan biomassa menghasilkan emisi gas rumah kaca yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar fosil seperti solar, dengan pengurangan hingga 79%-86% dari total emisi karbon. Pemanfaatan limbah biomassa seperti dedak padi untuk biodiesel juga mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan memperpanjang cadangan energi fosil serta menjadi bagian dari bauran energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Selain itu, pemanfaatan limbah bioamassa untuk produksi biodiesel, potensi pencemaran udara berkurang, dan limbah seperti gliserin yang dihasilkan dapat digunakan untuk aplikasi lain, seperti bahan kimia atau kosmetik sehingga mendukung konsep ekonomi sirkular (Hasan et al, 2014; Bakari et al., 2020).

Selain dampak lingkungan, pengolahan limbah biomassa dari hasil pertanian akan memberikan dampak positif secara aspek sosial. Pemanfaatan limbah biomassa untuk bioenergi dapat menciptakan lapangan kerja di sektor pengumpulan limbah, logistik, serta operasional pembangkit energi. Pembangunan fasilitas bioenergi berbasis limbah dapat memberikan manfaat ekonomi lokal dengan membuka lapangan kerja, terutama di daerah pedesaan (Bijarchiyan et al., 2020; Hoang et al, 2021). Hal ini sangat relevan di wilayah yang memiliki angka pengangguran tinggi dan keterbatasan akses pekerjaan. Selain peluang pekerjaan, tambahan nilai ekonomi dari sektor pertanian menjadi meningkat.

Produksi biodiesel dari dedak padi di Bangladesh telah memberikan dampak ekonomi sosial yang signifikan. Menurut penelitian Hasan et al. (2014), pemanfaatan dedak padi untuk biodiesel dapat meningkatkan pendapatan petani hingga 20% karena limbah hasil pertanian yang sebelumnya tidak bernilai kini memiliki pasar. Hal ini memberikan peluang tambahan ekonomi di komunitas pedesaan, terutama bagi petani kecil yang sangat tergantung pada hasil panen padi sebagai sumber

pendapatan utama. Dengan demikian, produksi biodiesel membantu meningkatkan kesejahteraan petani dengan menciptakan pasar untuk limbah yang sebelumnya tidak dimanfaatkan. Hal ini dapat memberikan insentif ekonomi bagi petani untuk mendukung praktik agrikultur yang berkelanjutan (Gontard et al., 2018).

Produksi bioenergi berbasis komunitas mendukung keberlanjutan energi di wilayah pedesaan. Dengan memanfaatkan sumber daya lokal, seperti dedak padi, komunitas dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil impor. Selain itu, sistem bioenergi yang menggunakan limbah biomassa dapat mendukung elektrifikasi pedesaan dengan menyediakan sumber energi bersih dan terjangkau, sebagaimana dicatat dalam penelitian tentang pengelolaan biomassa limbah untuk bioenergi di komunitas lokal (Ufitikirezi et al., 2024). Program bioenergi seperti ini memberikan akses energi bersih yang lebih murah bagi masyarakat yang berkontribusi pada peningkatan kualitas hidup (Go et al., 2021). Maka, implementasi produksi bioenergi dari limbah hasil pertanian menciptakan pendekatan yang terintegrasi untuk pengelolaan limbah, pengurangan emisi karbon, dan pengembangan energi terbarukan, yang mendukung target global dalam mengatasi perubahan iklim dan memastikan keberlanjutan energi.

4. Kesimpulan

Hasil penelitian potensi limbah hasil pertanian padi menjadi sumber bioenergi melalui konsep biorefineri dengan pendekatan *p-graph* dan analisis ekonomi teknik memberikan beberapa Kesimpulan, yaitu

1. Berdasarkan analisis optimasi limbah hasil pertanian padi sebagai sumber bioenergi dengan *p-graph*, solusi optimal dan solusi maksimal diperoleh setelah dilakukan *running* dari alur *superstructure*. Kedua solusi tersebut menunjukkan potensi dari pemanfaatan limbah biomassa. Solusi optimal menunjukkan proses transesterifikasi dedak padi menjadi biodiesel yang lebih *feasible* dengan keuntungan 9000 USD/tahun, namun untuk solusi maksimal dilakukan analisis ekonomi teknik karena produk yang dihasilkan lebih banyak sehingga pendekatan bioferineri bisa diimplementasi.
2. Hasil ekonomi teknik menunjukkan solusi maksimal menghasilkan beberapa produk bioenergi akan Investasi awal akan kembali seluruhnya pada tahun ke-8. Nilai IRR diperoleh sebesar 21.7%, sedangkan MARR (*Minimum Attractive Rate of Return*) 15% yang menunjukkan investasi layak untuk mendapatkan pendanaan.
3. Analisis secara sosial, dan lingkungan. Dari sisi lingkungan, pemanfaatan limbah biomasa untuk produksi bioenergi dan bahan bakar menghasilkan dampak positif berupa pengurangan emisi gas rumah kaca dan polusi, serta peningkatan kesuburan tanah melalui aplikasi biochar. Dari sisi sosial, produksi bioenergi berbasis komunitas mampu meningkatkan pendapatan dan kesejahteraan masyarakat pedesaan, khususnya petani. Dengan mengandalkan sumber energi terbarukan yang tersedia secara lokal, produksi bioenergi dapat mendukung kemandirian energi dan keberlanjutan energi di tingkat komunitas.

Ucapan Terima Kasih

Saya ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam penulisan paper ini. Terutama kepada beberapa petani padi yang secara sukerala ingin diwawancara dan memberikan jerami padi untuk analisis penelitian selanjutnya. Saya juga mengucapkan terima kasih kepada Jurusan Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan fasilitas dan sumber daya yang diperlukan untuk menyelesaikan penelitian ini. Tak lupa, saya mengucapkan terima kasih kepada keluarga saya atas dukungan moral dan motivasi yang terus-menerus.

Semoga kontribusi yang kecil ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan penelitian di masa yang akan datang.

Daftar Pustaka

- Alexandri, M., López-Gómez, J. P., Olszewska-Widdrat, A., & Venus, J. (2020). Valorising Agro-industrial Wastes within the Circular Bioeconomy Concept: The Case of Defatted Rice Bran with Emphasis on Bioconversion Strategies. *Fermentation*, 6(2), 42.
- Aziz, T., Shah, Z., Sarwar, A. *et al.* Production of bioethanol from pretreated rice straw, an integrated and mediated upstream fermentation process. (2023). *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2190-6823
- Badan Pusat Statistik. (2023). Produktivitas Padi Kabupaten Sleman 2023. [Diakses pada 23 November 2024]. Available online : <https://slemankab.bps.go.id/id/statistics-table/2/MTQ0IzI=/produksi-padi-kabupaten-sleman.html>
- Bakari, R., Kivevele, T., Huang, X., & Jande, Y. (2020). Simulation and optimisation of the pyrolysis of rice husk: Preliminary assessment for gasification applications. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 150, 104891.
- Bank Indonesia. (2024). Kurs Mata Uang Indonesia. [Diakses pada 23 Desember 2024]. Available online: <https://www.bi.go.id/id/statistik/informasi-kurs/transaksi-bi/default.aspx>
- Bazargan, A., Bazargan, M., & Mckay, G. (2015). Optimization of rice husk pretreatment for energy production. *Renewable Energy*, 77, 512-520.
- Benjamin, M. F. D., Ventura, J.-R. S., Sangalang, K. P. H., Adorna, J. A., Belmonte, B. A., & Andiappan, V. (2021). Optimal synthesis of Philippine agricultural residue-based integrated biorefinery via the P-graph method under supply and demand constraints. *Journal of Cleaner Production*, 308, 127348.
- Bhaskar, T., Bhavya, B., Singh, R., Naik, D., Kumar, A., & Goyal, H. (2011). Thermochemical Conversion of Biomass to Biofuels. *Biofuels*, 51-77
- Bijarchiyan, M., Sahebi, H., & Mirzamohammadi, S. (2020). A sustainable biomass network design model for bioenergy production by anaerobic digestion technology: using agricultural residues and livestock manure. *Energy, Sustainability and Society*, 10, 1-17.
- Byun, J., & Han, J. (2020). Sustainable development of biorefineries: integrated assessment method for co-production pathways. *Energy & Environmental Science*, 13(8), 2233.
- Chungsangunsit, T., Gheewala, S., & Patumsawad, S. (2009). Emission Assessment of Rice Husk Combustion for Power Production. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 3, 625-630.
- De Medeiros, E. M., Posada, J. A., Noorman, H., Osseweijer, P., & Filho, R. M. (2017). Hydrous bioethanol production from sugarcane bagasse via energy self-sufficient gasification-fermentation hybrid route: Simulation and financial analysis. *Journal of Cleaner Production*, 168, 1625–1635
- Diehlmann, F., Zimmer, T., Glöser-Chahoud, S., Wiens, M., & Schultmann, F. (2019). Techno-economic assessment of utilization pathways for rice straw: A simulation-optimization approach. *Journal of Cleaner Production*, 4, 369
- Elbasiouny, H., Elbanna, B., Al-Najoli, E., Alsherief, A., Negm, S., El-Nour, E., Nofal, A., & Sharabash, S. (2019). Agricultural Waste Management for Climate Change Mitigation: Some Implications to Egypt. *Waste Management in MENA Regions, Springer*, 149--169
- Elizabeth, R. (2021). Pemakaian Biogas: Hemat Biaya Bahan Bakar Dan Tambahan Pendapatan Rumah tangga Mendukung Ketahanan Energi. In *Risalah Kebijakan Pertanian Dan Lingkungan. Rumusan Kajian Strategis Bidang Pertanian dan Lingkungan*, 8 (3), 151.
- Elias, M., Hunt, J., Remucal, J., Saksa, P., Sanchez, D. L. (2022). *Biochar Carbon Credit Market Analysis: Examining the potential for coupled biochar and carbon credit production from wildfire fuel reduction projects in the Western U.S.* Blue Forest Conservation.
- Friedler, F., Aviso, K. B., Bertok, B., Foo, D. C., & Tan, R. R. (2019). *Prospects and challenges for chemical process synthesis with P-graph.* *Current Opinion in Chemical Engineering*, 26, 58–64.

- Go, A., Quijote, K., Agapay, R., Ju, Y., Angkawijaya, A., & Santoso, S. (2021). Biodiesel from rice bran lipids: resource assessment and technological review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 3475 - 3519.
- Gontard, N., Sonesson, U., Birkved, M., Majone, M., Bolzonella, D., Celli, A., Angellier-Coussy, H., Jang, G., Verniquet, A., Broeze, J., Schaer, B., Batista, A., & Sebok, A. (2018). A research challenge vision regarding management of agricultural waste in a circular bio-based economy. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 48, 614 - 654.
- Hasan, A., Wakil, M., & Kafy, M. (2014). Prospect of Rice Bran for Biodiesel Production in Bangladesh. *Procedia Engineering*, 90, 746-752.
- Hoang, A., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Carlucci, A., Ölçer, A., Le, A., & Ghassemi, A. (2021). Rice bran oil-based biodiesel as a promising renewable fuel alternative to petrodiesel: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 135, 110204.
- Hossain, A. (2015). Implementation of Alkaline Catalysed Transesterification Bioprocess in Biodiesel Preparation from Fresh Water Algae. *Global Journal of Biology, Agriculture, & Health*. 4(3), 27-32.
- Huang, X., Hu, Z., Miao, Z., Jiang, E., & Ma, X. (2020). Chemical looping gasification of rice husk to produce hydrogen-rich syngas under different oxygen carrier preparation methods. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(51), 26865–26876.
- Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2024). [Diakses pada 26 November 2024]. Available online : <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/hip-bbn-bioetanol-bulan-oktober-2024-ditetapkan-sebesar-rp14144-per-liter>
- Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2024). [Diakses pada 26 November 2024]. Available online: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/ditjen-ebtke-tetapkan-harga-hip-bbn-biodiesel-oktober-2024-senilai-rp12633-per-liter>
- Kumar, R., Kumar, G., & Chandrashekar, N. (2011). Microwave assisted alkali-catalyzed transesterification of Pongamia pinnata seed oil for biodiesel production.. *Bioresource technology*, 102 (11), 6617.
- Linam, F., Limmer, M.A., Ebling, A.M., Seyfferth, A.L.(2023). Rice husk and husk biochar soil amendments store soil carbon while water management controls dissolved organic matter chemistry in well-weathered soil. *Journal of Environmental Management*, 339, 117936,
- Liu, G., & Bao, J. (2017). Evaluation of electricity generation from lignin residue and biogas in cellulosic ethanol production. *Bioresource technology*, 243, 1232-1236.
- Mencarelli, L., Chen, Q., Pagot, A., Grossmann, I.E., (2020). A review on superstructure optimization approaches in process system engineering. *Computers & Chemical Engineering*, 136, 106808.
- Mutmainnah, S., Lamusa, A., & Chansa, S. Y. (2022). Analisis Pendapatan Usahatani Padi Sawah Desa Pewunu Kecamatan Dolo Barat Kabupaten Sigi. *Jurnal Pembangunan Agribisnis* (1) 3, 36).
- Nguyen, D., Scheer, C., Rowlings, D., & Grace, P. (2015). Rice husk biochar and crop residue amendment in subtropical cropping soils: effect on biomass production, nitrogen use efficiency and greenhouse gas emissions. *Biology and Fertility of Soils*, 52, 261 - 270.
- Niu, M., Huang, Y., Jin, B., Shaohua, L., Dong, Q., Gu, H., & Sun, R. (2019). A novel two-stage enriched air biomass gasification for producing low-tar high heating value fuel gas: Pilot verification and performance analysis. *Energy*, 2, 68.
- Raina, N., Slathia, P., & Sharma, P. (2020). Response surface methodology (RSM) for optimization of thermochemical pretreatment method and enzymatic hydrolysis of deodar sawdust (DS) for bioethanol production using separate hydrolysis and co-fermentation (SHCF). *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12, 5175 - 5195.
- Sangalang, K., Belmonte, B., Ventura, J., Andiappan, V., & Benjamin, M. (2021). P-graph method for optimal synthesis of philippine agricultural waste-based integrated Biorefinery. *Chemical engineering transactions*, 83, 103-108.

- Sreejith, C., Muraleedharan, C., & Arun, P. (2013). Thermo-Chemical Analysis of Biomass Gasification by Gibbs Free Energy Minimization Model-Part: II (Optimization of Biomass Feed and Steam to Biomass Ratio). *International Journal of Green Energy*, 10, 610 - 639.
- Sangalang, K.P.H., Belmonte, B.A., Ventura, J. S., Andiappan, V., Benjamin, M.F.D., (2021). P-graph Method for Optimal Synthesis of Philippine Agricultural Waste-based Integrated Biorefineri. *Chemical Engineering Transactions*. 83. 103-108.
- Saga, K., Imou, K., Yokoyama, S., & Minowa, T. (2010). Net energy analysis of bioethanol production system from high-yield rice plant in Japan. *Applied Energy*, 87, 2164-2168.
- Xu, H., Ou, L., Li, Y., Hawkins, T., & Wang, M. (2022). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Biodiesel and Renewable Diesel Production in the United States. *Environmental Science & Technology*, 56, 7512 - 7521.
- Ufitikirezi, J. D. M., Filip, M., Ghorbani, M., Zoubek, T., Olšan, P., Bumbalek, R., Strob, M., Bartoš, P., Umurungi, S., Murindangabo, Y., Heřmánek, A., Tupý, O., Havelka, Z., Stehlík, R., Černý, P., & Smutný, L. (2024). Agricultural Waste Valorization: Exploring Environmentally Friendly Approaches to Bioenergy Conversion. *Sustainability*.
- Yang, Z., Koh, S., Ng, W., Lim, R., Tan, H., Tong, Y., Dai, Y., Chong, C., & Wang, C. (2016). Potential application of gasification to recycle food waste and rehabilitate acidic soil from secondary forests on degraded land in Southeast Asia. *Journal of Environmental Management*, 172, 40-8.
- Yokayama, S. & Matsumura, Y. (2008). *The Asian Biomass Handbook*. Tokyo: The Japan Institute of Energy
- Zhao, P., Pu, F., Su, C., Wan, Y., Huang, T., Hou, X., Cai, D., (2024) Towards valorization of rice straw into bioethanol and lignin: Emphasizing critical role of deep eutectic solvent components in biorefining process. *Bioresource Technology*, 399(130635).