



INSTITUT PERTANIAN BOGOR

**STRATEGI PENGEMBANGAN INDUSTRI BIOETANOL
SAGU DENGAN PENERAPAN PRINSIP *BIOREFINERY*
DI KABUPATEN KEPULAUAN MERANTI**

DISERTASI

**NADIA DWI KARTIKA
P0602212029**

**SEKOLAH PASCASARJANA
ILMU PENGELOLAAN SUMBERDAYA ALAM DAN LINGKUNGAN
BOGOR
2026**



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI, SUMBER INFORMASI, PENGGUNAAN AI, DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul "Strategi Pengembangan Industri Bioetanol Sagu dengan Penerapan Prinsip *Biorefinery* di Kabupaten Kepulauan Meranti" merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar doktor di Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan. Karya ini merupakan karya saya dengan arahan dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal dari atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan oleh penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka pada bagian akhir disertasi ini.

Dalam penyusunan karya ini, penulis menggunakan bantuan kecerdasan buatan ChatGPT untuk penyuntingan, perbaikan tata bahasa, dan pembuatan gambar agar lebih rapi. Setelah menggunakan alat/layanan tersebut, penulis meninjau dan menyunting konten sesuai kebutuhan serta bertanggung jawab penuh atas isi karya tugas akhir ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta atas karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, September 2026

Nadia Dwi Kartika
P0602212029

© Hak Cipta milik IPB, tahun 20XX
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

SOROTAN

NADIA DWI KARTIKA. Strategi Pengembangan Bioetanol Berbasis Sagu dengan Penerapan Prinsip *Biorefinery* di Kabupaten Kepulauan Meranti. Dibimbing oleh NASTITI SISWI INDRASTI, LINA KARLINASARI, dan ANDES ISMAYANA.

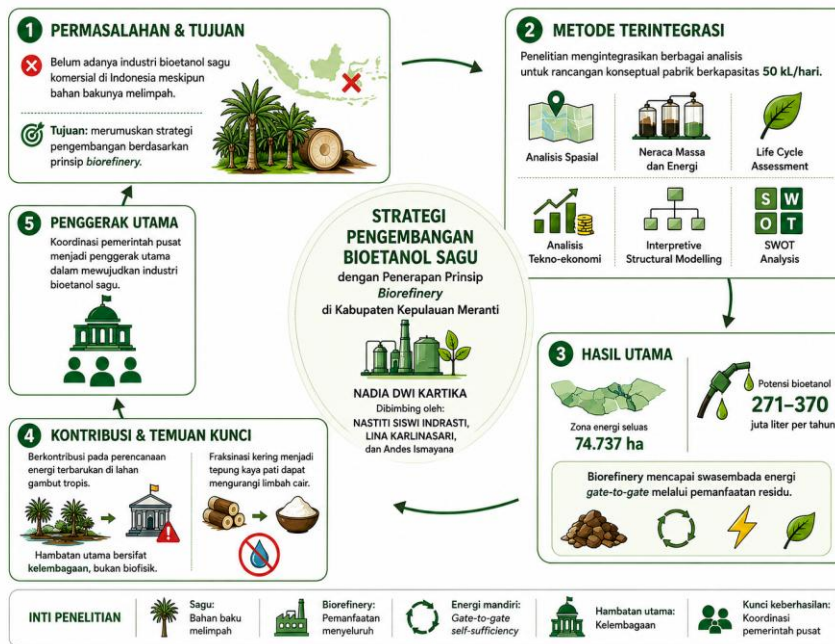
1. Penelitian ini membahas belum adanya industri bioetanol sagu komersial di Indonesia meskipun bahan bakunya melimpah, dengan tujuan merumuskan strategi pengembangannya berdasarkan prinsip *biorefinery*.
2. Penelitian mengintegrasikan analisis spasial, neraca massa dan energi, *life cycle assessment*, analisis tekno-ekonomi, *interpretative structural modelling*, dan SWOT untuk rancangan konseptual pabrik berkapasitas 50 kL/hari.
3. Hasil penelitian menunjukkan zona energi seluas 74.737 ha dengan potensi bioetanol sebesar 271–370 juta liter per tahun, serta *biorefinery* yang mencapai swasembada energi gate-to-gate melalui pemanfaatan residu.
4. Hasil penelitian ini berkontribusi pada perencanaan energi terbarukan di lahan gambut tropis dengan menunjukkan bahwa hambatan utamanya bersifat kelembagaan.
5. Penelitian menunjukkan bahwa fraksinasi kering menjadi tepung kaya pati dapat mengurangi limbah cair, sedangkan koordinasi pemerintah pusat menjadi penggerak utama dalam mewujudkan industri tersebut.

HIGHLIGHTS

NADIA DWI KARTIKA. *Development Strategy for a Sago-Based Bioethanol Industry Applying Biorefinery Principles in the Meranti Islands Regency. Supervised by NASTITI SISWI INDRASTI, LINA KARLINASARI, and ANDES ISMAYANA.*

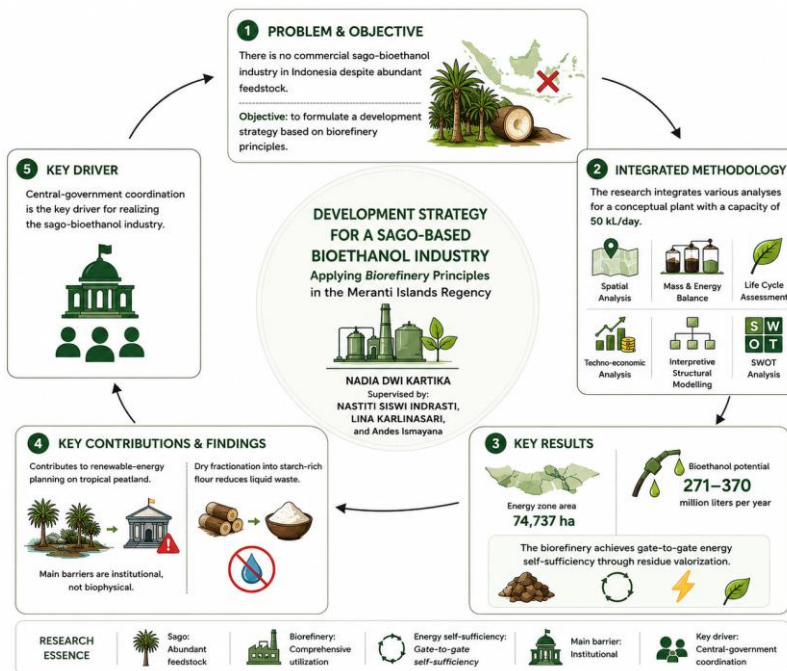
1. *This study addresses the absence of a commercial sago-bioethanol industry in Indonesia despite abundant feedstock, aiming to formulate a development strategy based on biorefinery principles.*
2. *The research integrates spatial analysis, mass–energy balance, life cycle assessment, techno-economic analysis, interpretative structural modelling, and SWOT for a conceptual 50 kL/day plant.*
3. *Results indicate a 74,737 ha energy zone with a potential of 271–370 million liters of bioethanol per year, and a biorefinery that reaches gate-to-gate energy self-sufficiency through residue valorization.*
4. *The findings contribute to renewable-energy planning on tropical peatland, showing that the main barriers are institutional rather than biophysical.*
5. *The study demonstrates that dry fractionation into starch-rich flour reduces liquid waste and that central-government coordination is the key driver for realizing the industry.*

RINGKASAN VISUAL



Pengembangan Bioetanol Sagu Berbasis *Biorefinery*

GRAPHICAL SUMMARY



Sago-based Bioethanol Development through Biorefinery

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

RINGKASAN

NADIA DWI KARTIKA. Strategi Pengembangan Industri Bioetanol Sagu dengan Penerapan Prinsip *Biorefinery* di Kabupaten Kepulauan Meranti. Dibimbing oleh NASTITI SISWI INDRASTI, LINA KARLINASARI, dan ANDES ISMAYANA.

Ketergantungan Indonesia pada bahan bakar fosil mendorong pemerintah menetapkan target penyediaan bioetanol 1,2 juta kiloliter per tahun melalui Peraturan Presiden Nomor 40 Tahun 2023, guna mendukung mandatori E5 dan rencana E10 pada 2030. Namun, kapasitas produksi *fuel-grade* nasional hanya mencakup kurang dari 6% dari kebutuhan nasional. Sagu (*Metroxylon sagu* Rottb.) di Kabupaten Kepulauan Meranti berpotensi mendukung pengembangan bioetanol karena memiliki produktivitas pati yang tinggi dan dapat tumbuh di lahan gambut melalui sistem paludikultur. Meskipun memiliki potensi besar, pengembangan industrinya memerlukan strategi yang mengintegrasikan aspek teknis, lingkungan, ekonomi, dan kelembagaan. Penelitian ini bertujuan merumuskan strategi pengembangan industri bioetanol berbasis sagu dengan penerapan prinsip *biorefinery* melalui enam analisis: (1) potensi bahan baku dan ketersediaan lahan berbasis GIS; (2) neraca massa dan energi sistem *biorefinery* skala industri 50 kL/hari; (3) penilaian dampak lingkungan dengan *Life Cycle Assessment* (LCA) *gate-to-gate* tiga skenario energi; (4) analisis kelayakan tekno-ekonomi berbasis *Discounted Cash Flow*; (5) pemetaan struktur pemangku kepentingan dengan *Interpretative Structural Modelling* (ISM); dan (6) perumusan strategi SWOT-TOWS-QSPM.

Hasil analisis spasial mengidentifikasi 130.170 ha lahan sesuai sagu, terdiri atas 55.433 ha zona pangan dan 74.737 ha zona energi, dengan potensi bioetanol sebesar 271–370 juta liter/tahun. Tren luas panen dan produksi pati 2014–2024 menunjukkan pertumbuhan yang konsisten (231,49 ha/tahun; $R^2=0,917$), dengan produktivitas meningkat dari 5,19 menjadi 6,59 ton/ha. Neraca massa-energi menunjukkan bahwa sistem *biorefinery* terintegrasi yang memanfaatkan *co-product* padat sagu dan biogas *stillage* mampu memenuhi kebutuhan energi pabrik secara internal. Hasil LCA menunjukkan bahwa skenario *biorefinery* terintegrasi (S3-BES) menurunkan *Global Warming Potential* sebesar 89% (dari 1,74 menjadi 0,19 kg CO₂-eq/L) dan deplesi fosil sebesar 91%, yang divalidasi melalui simulasi *Monte Carlo* dengan 10.000 iterasi. Analisis tekno-ekonomi menunjukkan hanya S3-BES yang layak dengan NPV USD 6,50 juta, IRR 15,11%, *payback period* 5,8 tahun, dan *Minimum Selling Price* USD 0,52/L. Analisis ISM menempatkan Pemerintah Pusat sebagai aktor penggerak utama dalam pengembangan industri bioetanol sagu dengan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral sebagai pembuat kebijakan, sedangkan integrasi SWOT-TOWS-QSPM menghasilkan 16 strategi prioritas yang berfokus pada pengembangan *biorefinery*, penguatan kelembagaan dan pembiayaan hijau, pengelolaan paludikultur, serta diversifikasi produk.

Penelitian ini menghasilkan kerangka analisis terintegrasi yang menghubungkan analisis spasial, neraca massa dan energi, LCA, TEA, ISM, serta SWOT-TOWS-QSPM dalam penyusunan strategi pengembangan industri bioetanol berbasis sagu di lahan gambut tropis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan prinsip *biorefinery* menjadi dasar untuk mencapai kelayakan teknis, lingkungan, dan ekonomi, sedangkan keberhasilan implementasinya bergantung pada penguatan kelembagaan, dukungan pembiayaan, serta kebijakan yang terintegrasi.

Kata kunci: bioetanol, *biorefinery*, Kabupaten Kepulauan Meranti, paludikultur, sagu



SUMMARY

NADIA DWI KARTIKA. Development Strategy for Sago-Based Bioethanol Industry with the Application of Biorefinery Principles in Meranti Islands Regency. Supervised by NASTITI SISWI INDRASTI, LINA KARLINASARI, and ANDES ISMAYANA.

Indonesia's dependence on fossil fuels has prompted the government to establish a national bioethanol supply target of 1.2 million kiloliters per year through Presidential Regulation No. 40 of 2023 to support the E5 mandate and the planned E10 implementation by 2030. However, national fuel-grade bioethanol production capacity currently accounts for less than 6% of national demand. Sago (*Metroxylon sagu* Rottb.) in the Meranti Islands Regency has the potential to support bioethanol development due to its high starch productivity and its ability to grow on peatlands under a paludiculture system. Despite this potential, industrial development requires a strategy that integrates technical, environmental, economic, and institutional aspects. This study aimed to formulate a strategy for developing a sago-based bioethanol industry through the application of biorefinery principles using six analyses: (1) GIS-based assessment of feedstock potential and land availability; (2) mass and energy balance of a 50 kL/day industrial-scale biorefinery system; (3) environmental impact assessment using gate-to-gate Life Cycle Assessment (LCA) under three energy scenarios; (4) techno-economic feasibility analysis based on Discounted Cash Flow; (5) stakeholder structure mapping using Interpretative Structural Modelling (ISM); and (6) strategy formulation using SWOT-TOWS-QSPM.

The spatial analysis identified 130,170 ha of land suitable for sago cultivation, comprising 55,433 ha of food-production zones and 74,737 ha of energy zones, with a bioethanol production potential of 271–370 million liters/year. Trends in harvested area and starch production from 2014 to 2024 showed consistent growth (231.49 ha/year; $R^2 = 0.917$), with productivity increasing from 5.19 to 6.59 tons/ha. The mass and energy balance demonstrated that an integrated biorefinery system utilizing solid sago co-products and stillage-derived biogas could meet the plant's energy requirements internally. The LCA results showed that the integrated biorefinery scenario (S3-BES) reduced Global Warming Potential by 89% (from 1.74 to 0.19 kg CO₂-eq/L) and fossil depletion by 91%, as validated through a Monte Carlo simulation with 10,000 iterations. The techno-economic analysis indicated that only the S3-BES scenario was economically feasible, with an NPV of USD 6.50 million, an IRR of 15.11%, a payback period of 5.8 years, and a Minimum Selling Price of USD 0.52/L. The ISM analysis identified the Central Government as the primary driver of the development of the sago-based bioethanol industry, with the Ministry of Energy and Mineral Resources serving as the key policymaking institution. Meanwhile, the integration of SWOT-TOWS-QSPM generated 16 priority strategies focusing on biorefinery development, institutional strengthening, green financing, paludiculture management, and product diversification.

This study developed an integrated analytical framework that links spatial analysis, mass and energy balance, LCA, TEA, ISM, and SWOT-TOWS-QSPM to formulate a development strategy for a sago-based bioethanol industry in tropical peatlands. The findings demonstrate that applying biorefinery principles provides a foundation for achieving technical, environmental, and economic feasibility, while successful implementation depends on institutional strengthening, financing support, and integrated policy measures.

Keywords: bioethanol, biorefinery, Meranti Islands Regency, paludiculture, sago



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Prof. Dr.-Ing. Dr. Ir. Suprihatin, IPU
- 2 Dr. Ir. Agus Nurrohim, M.Eng.

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Prof. Dr.-Ing. Dr. Ir. Suprihatin, IPU
- 2 Dr. Ir. Agus Nurrohim, M.Eng.



Judul Disertasi : Strategi Pengembangan Industri Bioetanol Berbasis Sagu dengan Penerapan Prinsip *Biorefinery* di Kabupaten Kepulauan Meranti

Nama : Nadia Dwi Kartika
NIM : P0602212029

@Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr. Ir. Nastiti Siswi Indrasti, IPU, ASEAN-Eng.

Pembimbing 2:

Prof. Dr. Lina Karlinasari, M.Sc.F.Trop.

Pembimbing 3:

Dr. Andes Ismayana, S.TP., M.T.

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

Prof. Dr. Lina Karlinasari, S.Hut., M.Sc.F.Trop.
NIP 197311261998022001

Dekan Sekolah Pascasarjana:

Prof. Dr. Ir. Yusli Wardiatno, M.Sc.
NIP 196607281991031002

Tanggal Ujian Tertutup: 10 Agustus 2026
Tanggal Ujian Promosi: 1 September 2026

Tanggal Lulus:
Tanggal Pengesahan Disertasi: 9 September 2026



PRAKATA

Puji syukur kepada Allah Subhanahu wa Ta'ala atas terselesainya disertasi ini sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan.

Disertasi ini disusun untuk merumuskan strategi pengembangan industri bioetanol berbasis sagu yang komprehensif dan berbasis bukti ilmiah. Penelitian ini mengintegrasikan analisis teknis melalui neraca massa dan energi, evaluasi kinerja lingkungan menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) berbasis *gate-to-gate*, serta pemetaan struktur dan dinamika pemangku kepentingan menggunakan *Interpretative Structural Modelling* (ISM). Integrasi tersebut dilakukan untuk menghasilkan strategi yang tidak hanya layak secara teknis dan rasional dari sisi energi, tetapi juga berkelanjutan dari sisi lingkungan serta realistis dalam konteks kelembagaan dan tata kelola daerah.

Pemilihan sagu sebagai fokus kajian didasarkan pada potensi sumber daya yang signifikan di Kabupaten Kepulauan Meranti dan wilayah sekitarnya, yang hingga kini belum dimanfaatkan secara optimal untuk pengembangan industri bioenergi skala komersial. Oleh karena itu, disertasi ini berupaya menyusun arah pengembangan yang mempertimbangkan aspek teknis proses, efisiensi energi, pemanfaatan hasil samping, serta peran aktor kunci dalam mendorong implementasi industri yang berkelanjutan.

Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Nastiti Siswi Indrasti, IPU, ASEAN-Eng. sebagai Ketua Komisi Pembimbing, Prof. Dr. Lina Karlinasari, M.Sc.F.Trop., dan Dr. Andes Ismayana, S.TP., M.T. sebagai anggota komisi pembimbing yang telah memberikan bimbingan, transfer ilmu, motivasi, arahan, dan ketegasan akademik selama proses penelitian.
2. Prof. Dr.-Ing. Dr. Ir. Suprihatin, IPU. dan Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, M.T. sebagai penguji prakualifikasi lisan yang telah memberikan masukan untuk desain penelitian.
3. Prof. Dr.-Ing. Dr. Ir. Suprihatin, IPU. dan Dr. Ir. Agus Nurrohim, M.Eng. selaku Penguji Luar Komisi pada Ujian Kualifikasi tertutup dan terbuka yang memberikan masukan untuk pembahasan disertasi agar lebih mendalam dan komprehensif.
4. Ir. Agus Sugiyono, M. Eng., Dr. Ir. Dyah Primarini Meidiawati, M. Eng., Dr. Arif Dwi Santoso, S.Pi., M. Eng., Dr. Despry Nur Annisa Ahmad, S.T., M. Eng., Dr. Sulastri, S.P., M.Sc., Dr. Ir. Ira Fitriana, M. Sc., dan Ir. La Ode Muhammad Abdul Wahid atas kontribusi pemikiran, klarifikasi metodologis, serta diskusi substantif yang memperkuat pemahaman dan ketajaman analisis dalam disertasi ini.
5. Bapak Miftah selaku Sekretaris Dinas Perdagangan dan Perindustrian Kabupaten Kepulauan Meranti atas peran aktif dalam memfasilitasi koordinasi dan pelaksanaan diskusi kelompok terfokus dengan para pemangku kepentingan daerah; serta Pemerintah Kabupaten Kepulauan Meranti, para petani sagu, dan seluruh responden penelitian atas dukungan data, informasi lapangan, dan partisipasi yang sangat berarti dalam memperkuat substansi penelitian ini.

6. Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) Kementerian Keuangan Republik Indonesia atas dukungan pendanaan pendidikan dan kepercayaan yang diberikan kepada penulis untuk menempuh dan menyelesaikan studi doktoral ini.
7. Prof. Hiroshi Ehara, Ph.D., Seiji Hata, Ph.D., Dr. Ir. Arief Heru Kuncoro, M.T., Aldilla Sari Utami, M.Si., M.Sc., Ph.D., Zulfikar, dan Wenny Ipmawan atas kesediaan meluangkan waktu untuk diskusi akademik mengenai hasil penelitian, khususnya pada aspek analisis pemangku kepentingan.
8. Para staf, pengajar, dan mahasiswa Program Studi Ilmu Sumberdaya Alam dan Lingkungan IPB University.
9. Kepala Pusat Riset Teknologi Konversi Energi, Tata Sutardi, Ph.D., dan rekan-rekan di Kelompok Riset *Analysis and Optimization of Energy Generation System* (AOE Genesys) yang selalu memberikan semangat dan dukungan.
10. Orang tua, Kiyi, Mamik dan Noushad yang telah memberikan dukungan dan doa hingga studi doktoral ini dapat diselesaikan dengan baik. Secara khusus kepada Mang Can yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk belajar banyak hal sejak awal masuk di bidang pengkajian dan penerapan teknologi.
11. Teman-teman yang kebersamaan sejak awal masuk BPPT hingga sekarang di BRIN dan di luar BPPT/BRIN yang selalu memberikan semangat agar studi ini segera diselesaikan.
12. Diri sendiri karena sudah berusaha sampai sejauh ini terlepas dari kendala dan masalah yang datang terus-menerus.

Penulis juga menyampaikan penghormatan dan rasa terima kasih yang mendalam kepada Dr. Ir. Agus Eko Tjahjono, M.Eng., rahimahullah yang selama menjadi Anggota Komisi Pembimbing telah memberikan bimbingan, arahan, wawasan, dan semangat kepada penulis dalam menyelesaikan penelitian ini. Beliau berpulang ke rahmatullah pada 2 April 2026 sebelum disertasi ini dapat diselesaikan, namun berbagai masukan, pemikiran, dan keteladanan beliau tetap menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari proses penyusunan disertasi ini. Penulis mengenang beliau sebagai sosok akademisi yang berdedikasi, rendah hati, dan selalu mendorong lahirnya pemikiran ilmiah yang kritis. Semoga Allah Subhanahu wa Ta'ala melimpahkan rahmat dan ampunan serta menempatkan almarhum di tempat terbaik di sisi-Nya.

Bogor, September 2026

Nadia Dwi Kartika

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan	5
1.4 Manfaat	5
1.5 Ruang Lingkup	6
1.6 Kerangka Pemikiran	6
1.7 Kebaruan (<i>Novelty</i>)	8
II TINJAUAN PUSTAKA.....	11
2.1 Peran Global dan Kebijakan Nasional Indonesia Bioetanol	11
2.2 Tanaman Sagu	13
2.3 Bioetanol sebagai Energi Terbarukan	16
2.4 Konsep <i>Biorefinery</i>	19
2.5 <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA)	21
2.6 Kelayakan Ekonomi Industri Bioetanol Berbasis Bahan Baku Pati	23
2.7 Pemangku Kepentingan dalam Pengembangan Industri Bioenergi	24
2.8 Strategi Pengembangan Industri Bioenergi	25
III POTENSI DAN KETERSEDIAAN BAHAN BAKU SAGU UNTUK PENGEMBANGAN INDUSTRI BIOETANOL	29
3.1 Abstrak	29
3.2 Pendahuluan	29
3.3 Metode	30
3.4 Hasil dan Pembahasan	34
3.5 Simpulan	45
IV ANALISIS NERACA MASSA, NERACA ENERGI DAN VALORISASI <i>CO-PRODUCT</i>	46
4.1 Abstrak	46
4.2 Pendahuluan	46
4.3 Metode	47
4.4 Hasil dan Pembahasan	54
4.5 Simpulan	65
V ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN PROSES BIOETANOL SAGU DENGAN PENDEKATAN <i>LIFE CYCLE ASSESSMENT</i> BATASAN <i>GATE-TO-GATE</i>	66
5.1 Abstrak	66
5.2 Pendahuluan	66
5.3 Metode (Judul subbab disesuaikan dengan bidang keilmuan)	67
5.4 Hasil dan Pembahasan	74



5.5	Simpulan	83
VI	TEKNO-EKONOMI PABRIK KONSEPTUAL BIOETANOL SAGU KAPASITAS 50 KL/HARI	85
6.1	Abstrak	85
6.2	Pendahuluan	85
6.3	Metode Analisis	86
6.4	Hasil dan Pembahasan	93
6.5	Simpulan	107
VII	TINGKAT PEMANGKU KEPENTINGAN PADA PENGEMBANGAN INDUSTRI BIOETANOL SAGU	109
7.1	Abstrak	109
7.2	Pendahuluan	109
7.3	Metode Analisis	110
7.4	Hasil dan Pembahasan	114
7.5	Simpulan	125
VIII	STRATEGI PENGEMBANGAN INDUSTRI BIOETANOL BERBASIS SAGU.....	126
8.1	Abstrak	126
8.2	Pendahuluan	126
8.3	Metode	127
8.4	Hasil dan Pembahasan	131
8.5	Simpulan	148
IX	PEMBAHASAN UMUM	149
9.1	Sintesis Enam Tujuan	150
9.2	Sumber Energi sebagai Faktor Penentu Kinerja Sistem	150
9.3	Sinergi Ketahanan Energi, Mitigasi Perubahan Iklim, dan Kesejahteraan Masyarakat	151
9.4	Pengembangan Nasional dan Pentingnya Implementasi Bertahap	152
9.5	Pelajaran dari Pengalaman Regional	153
9.6	Kontribusi Metodologis dan Refleksi Paradigma Paludikultur	153
9.7	Keterbatasan Penelitian dan Implikasi Kebijakan Multisektor	154
X	SIMPULAN UMUM DAN SARAN	156
10.1	Simpulan Umum	156
10.2	Saran	157
	DAFTAR PUSTAKA.....	159
	LAMPIRAN	177
	RIWAYAT HIDUP	185

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR TABEL

1	Matriks kebaruan dan perbandingan penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian ini	8
2	Sejarah kebijakan nasional pengembangan bioetanol Indonesia	11
3	Produsen etanol/bioetanol Indonesia dan kapasitas produksi	12
4	Komposisi kimia empulur batang sagu berdasarkan berat kering	15
5	Perbandingan produktivitas pati sagu dengan tanaman pati lainnya	15
6	Spesifikasi Teknis Bioetanol Bahan Bakar (<i>Fuel-Grade Ethanol</i>) di Indonesia	17
7	Klasifikasi Sistem <i>Biorefinery</i> Berdasarkan IEA Bioenergy Task 42	20
8	Distribusi produksi pati sagu per kecamatan di Kabupaten Kepulauan Meranti tahun 2024	35
9	Potensi Bahan Baku dan Bioetanol Zona Energi Kabupaten Kepulauan Meranti pada Dua Skenario Produktivitas	38
10	Asumsi-asumsi perhitungan pada neraca massa, neraca energi, dan valorisasi pada penelitian	49
11	Aliran <i>input-output</i> massa batang sagu pada tahap fraksinasi kering	55
12	Aliran input-output tahap konversi biokimia tepung kaya pati menjadi bioetanol 99,5%	57
13	Neraca energi termal dan listrik sistem <i>biorefinery</i> sagu kapasitas 50 kL/hari	58
14	Komparasi produktivitas etanol dari beberapa bahan baku	61
15	Komparasi konsumsi energi spesifik dan status kemandirian energi bioetanol berbasis pati	62
16	Karakteristik konfigurasi energi tiga skenario LCA bioetanol sagu	69
17	<i>Life Cycle Inventory</i> (LCI) bioetanol sagu per 1 L etanol 99,5%	70
18	Kategori dampak lingkungan yang dievaluasi dalam analisis LCA gate-to-gate bioetanol sagu (metode CML-IA baseline)	71
19	Nilai 11 kategori dampak lingkungan sistem bioetanol sagu <i>gate-to-gate</i> pada tiga skenario energi per 1 L	74
20	Hasil simulasi <i>Monte Carlo</i> untuk GWP dan ADP-fossil (P5 – P95, 10.000 iterasi)	81
21	Perbandingan nilai GWP bioetanol sagu dengan bahan baku bioetanol generasi pertama lainnya	82
22	Asumsi teknis operasi pabrik konseptual bioetanol sagu 50 kL/hari	87
23	Karakteristik tiga skenario dalam analisis TEA	88
24	Ringkasan biaya belanja modal (CAPEX)	93
25	Ringkasan biaya operasional (OPEX)	95
26	Pendapatan tahunan pabrik bioetanol sagu pada tiga skenario energi	96
27	Kelayakan finansial pabrik bioetanol sagu pada tiga skenario energi	97
28	MSP dan margin keamanan terhadap HIP	99
29	Hasil analisis sensitivitas S3-BES terhadap CAPEX/TCI	99
30	Hasil analisis sensitivitas S3-BES terhadap harga sagu	99
31	Hasil analisis sensitivitas S3-BES terhadap harga etanol	100
32	Analisis sensitivitas geopolitik S3-BES pada harga bahan baku sagu	102
33	Perbandingan strategis bioetanol sagu, tebu, dan jagung	104
34	Perbandingan indikator kelayakan bioetanol sagu dengan studi TEA bioetanol berbasis pati lainnya	105
35	Dampak sosio-ekonomi yang diharapkan dari pengembangan bioetanol sagu	106
36	Profil pakar kuesioner ISM pengembangan industri bioetanol sagu	112

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

37	Identifikasi pemangku kepentingan dalam pengembangan industri bioetanol sagu di Kabupaten Kepulauan Meranti	113
38	Final <i>Reachability Matrix</i> (FRM) dengan Nilai <i>Driver Power</i> (DP) dan <i>Dependence</i> (D)	115
39	Klasifikasi kuadran MICMAC pemangku kepentingan dalam pengembangan industri bioetanol sagu	115
40	Pemangku kepentingan di kuadran III dan implikasi strategisnya	117
41	Kendala dan peluang koordinasi antarpemangku kepentingan pada pengembangan industri bioetanol berbasis sagu	122
42	Perbandingan kelembagaan biodiesel sawit dan bioetanol sagu	123
43	Potensi manfaat implementasi industri bioetanol sagu dan prasyarat kelembagaannya	124
44	Matriks TOWS dan empat strategi pada empat kuadran	128
45	Faktor kekuatan (<i>strengths</i>) sistem bioetanol sagu berbasis <i>biorefinery</i>	131
46	Faktor kelemahan (<i>weaknesses</i>) sistem bioetanol sagu berbasis <i>biorefinery</i>	132
47	Faktor peluang (<i>opportunities</i>) sistem bioetanol sagu berbasis <i>biorefinery</i>	132
48	Faktor ancaman (<i>threats</i>) sistem bioetanol sagu berbasis <i>biorefinery</i>	133
49	Formulasi strategi pengembangan industri bioetanol sagu berbasis matriks TOWS	140
50	<i>Internal Factor Evaluation</i> (IFE) <i>Matrix</i> untuk sistem bioetanol sagu	141
51	<i>External Factor Evaluation</i> (EFE) <i>Matrix</i> untuk sistem bioetanol sagu	142
52	Ringkasan <i>Total Attractiveness Score</i> (TAS) dan ranking 16 strategi TOWS	143
53	Empat celah kelembagaan kritis dan strategi dengan TAS tertinggi	144

DAFTAR GAMBAR

1	Kerangka pemikiran penelitian	7
2	Kebaruan penelitian dalam pengembangan industri bioetanol sagu dengan penerapan prinsip <i>biorefinery</i>	10
3	Morfologi tanaman sagu	14
4	Proses pembuatan fuel-grade ethanol	18
5	Diagram konsep sistem <i>biorefinery</i> berbasis pati menurut IEA Bioenergy Task 42	21
6	Empat fase metodologi LCA berdasarkan ISO 14040:2006	22
7	Kabupaten Kepulauan Meranti di Provinsi Riau	30
8	Diagram alir prosedur kerja analisis potensi dan ketersediaan bahan baku sagu	33
9	Luas lahan dan produksi pati sagu di Kabupaten Kepulauan Meranti tahun 2014 – 2024	36
10	Peta tutupan lahan Kabupaten Kepulauan Meranti	37
11	Peta sebaran lahan sagu Kabupaten Kepulauan Meranti	38
12	Jaringan transportasi sungai dan selat sebagai tulang punggung rantai pasok sagu	42
13	Posisi geografis Kabupaten Kepulauan Meranti dan sebaran kilang minyak Pertamina di Indonesia	44
14	Diagram alir proses produksi bioetanol sagu dalam sistem tertutup atau <i>biorefinery</i> terintegrasi	49
15	Distribusi persentase output neraca massa basis bioetanol 50 kL per hari	59

16	Aliran energi lengkap pada proses bioetanol sagu	60
17	Perbandingan konsumsi energi spesifik dan status kemandirian energi pada berbagai sistem bioetanol berbasis pati	64
18	Aliran massa, energi, dan valorisasi residu lengkap pada proses bioetanol sagu dengan penerapan prinsip biorefinery	65
19	Kerangka metodologi LCA pada proses bioetanol sagu	69
20	Distribusi kontribusi proses terhadap kategori dampak lingkungan pada berbagai skenario energi	76
21	Perbandingan dampak GWP dan ADP-fossil pada tiga skenario energi	76
22	Kontribusi per proses GWP dan ADP-fossil pada tiga skenario	77
23	Asidifikasi, eutrofikasi dan oksidasi fotokimia pada tiga skenario	78
24	Perbandingan kategori toksisitas pada tiga skenario	80
25	Dampak ADP-elements dan ODP pada tiga skenario	81
26	Distribusi kumulatif pada dampak GWP dan ADP-fossil	82
27	Diagram alir analisis kelayakan tekno-ekonomi	93
28	Arus kas kumulatif S3-BES selama 15 tahun	99
29	Tornado chart sensitivitas NPV skenario S3-BES terhadap variasi $\pm 10\%$ harga jual etanol, harga bahan baku sagu, dan biaya investasi	102
30	Visualisasi hasil sensitivitas geopolitik untuk NPV dan IRR pada empat skenario	104
31	Matriks driver power-dependence untuk klasifikasi pemangku kepentingan	115
32	Matriks driver power-dependence pemangku kepentingan pengembangan industri bioetanol sagu	117
33	Struktur hierarki ISM pada pengembangan industri bioetanol berbasis sagu	122
34	Diagram alir analisis perumusan strategi pengembangan industri bioetanol sagu	131
35	Posisi strategi pengembangan industri bioetanol berbasis sagu di Kabupaten Kepulauan Meranti berdasarkan Matriks Internal–Eksternal	145
36	Peta jalan implementasi strategi tiga fase (2026–2035)	147

DAFTAR LAMPIRAN

1	Luas Panen dan Produksi Sagu di Kabupaten Kepulauan Meranti Tahun 2019–2024	179
2	Perhitungan sensitivitas yield biogas	180
3	Panduan Wawancara	181
4	Kuesioner <i>Interpretative Structural Modelling</i> (ISM)	184
5	Struktur SSIM dan FRM pada ISM	185



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.