

OPTIMASI FORMULA PEMBUATAN BUSA POLIURETAN KAKU BERBASIS LIGNIN DARI LINDI HITAM SEBAGAI INSULATOR TERMAL

NAUROTUL HUSNA



**PROGRAM STUDI ILMU DAN TEKNOLOGI HASIL HUTAN
FAKULTAS KEHUTANAN DAN LINGKUNGAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Optimasi Formula Pembuatan Busa Poliuretan Kaku Berbasis Lignin dari Lindi Hitam sebagai Insulator Termal” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir tesis ini.

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

Bogor, Januari 2025

Naurotul Husna
E2501231010

- 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.





RINGKASAN

NAUROTUL HUSNA. Optimasi Formula Pembuatan Busa Poliuretan Kaku Berbasis Lignin dari Lindi Hitam sebagai Insulator Termal. Dibimbing oleh WASRIN SYAFII, DEDED SARIP NAWAWI, dan MAYA ISMAYATI.

Busa poliuretan kaku banyak digunakan sebagai insulator termal. Permintaan pasar busa poliuretan terus mengalami peningkatan, namun, bahan baku busa poliuretan kaku yang saat ini beredar secara komersial berasal dari bahan baku yang berbasis minyak bumi. Oleh karena itu, bahan baku alternatif yang bersifat terbarukan perlu dikembangkan. Salah satu bahan yang berpotensi dimanfaatkan yaitu lignin dari lindi hitam karena memiliki banyak gugus hidroksil dan ketersediaannya melimpah. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik lignin hasil isolasi dari lindi hitam *kraft pulping* kayu *Acacia crassicarpa*, menentukan jenis pelarut lignin untuk pembuatan busa poliuretan, optimasi formula pembuatan busa poliuretan kaku dengan sifat konduktivitas termal dan *flammability* yang rendah, dan menganalisis karakteristik busa poliuretan kaku berbasis lignin dengan formula optimum.

Lignin diisolasi dari lindi hitam dengan teknik pengendapan menggunakan asam klorida (HCl) 1 M dan pencucian sebanyak enam kali. Lignin digunakan sebagai polioli pada pembuatan busa poliuretan kaku menggunakan pelarut dimetil formamida (DMF), dimetil sulfoksida (DMSO), dan tetrahidrofuran (THF). Hasil optimasi menggunakan *Response Surface Method* (RSM) dengan desain d-optimal menunjukkan dua formula terbaik, yaitu formula A (pelarut DMF, konsentrasi lignin 13,252%, nisbah Metilen difenil diisosianat (MDI):lignin 4,094:1) dan formula B (pelarut DMSO, konsentrasi lignin 13,252%, MDI:lignin 4,094:1). Formula A menghasilkan busa poliuretan dengan konduktivitas termal sebesar 0,109 W/mK dan penurunan massa saat pengujian *flammability* sebesar 1,421%. Formula B menghasilkan busa poliuretan dengan konduktivitas termal sebesar 0,103 W/mK dan penurunan massa saat pengujian *flammability* sebesar 0,886%. Formula B menghasilkan busa poliuretan kaku dengan konduktivitas termal lebih rendah dan sifat fisik serta mekanis lebih tinggi dibandingkan dengan formula A, namun mengalami penurunan massa saat pengujian *flammability* lebih tinggi dibandingkan dengan formula A.

Kata kunci: busa poliuretan kaku, isolasi lignin, lindi hitam, optimasi

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan 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.



SUMMARY

NAUROTUL HUSNA. Optimization Formula of Lignin-Based Rigid Polyurethane Foam from Black Liquor as Thermal Insulator. Supervised by WASRIN SYAFII, DEDED SARIP NAWAWI, and MAYA ISMAYATI.

Rigid polyurethane foam has been widely used as a thermal insulator. The market demand for polyurethane foam continues to increase. However, the raw materials for rigid polyurethane foam that are currently commercially available come from non-renewable petroleum-based raw materials. Therefore, alternative renewable raw materials need to be developed. One of the materials that has the potential to be utilized is lignin from black liquor because it has many hydroxyl groups and is abundantly available. This study aims to analyze the characteristics of lignin isolated from black liquor kraft pulping of *Acacia crassiparva* wood, determine the type of lignin solvent that can be used in the manufacture of polyurethane foam, optimize the formula for making rigid polyurethane foam with low thermal conductivity and flammability properties, and analyze the characteristics of rigid polyurethane foam based on lignin with the optimum formula from the optimization process.

Black liquor was isolated by adding hydrochloric acid (HCl) 1 M to pH 2 and washing six times to obtain lignin powder. The results of this study indicate that lignin was successfully isolated from black liquor through an acidification process. Isolated lignin from black liquor can also be utilized as a polyol in the manufacture of rigid polyurethane foam using dimethyl formamide (DMF), dimethyl sulfoxide (DMSO), and tetrahydrofuran (THF) solvents. The optimization results using the Response Surface Method (RSM) with d-Optimal design showed two best formulas, formula A (DMF solvent, lignin concentration 13.252%, Methylene diphenyl diisocyanate (MDI):lignin ratio 4.094:1) and formula B (DMSO solvent, lignin concentration 13.252%, MDI:lignin ratio 4.094:1). Formula A has a thermal conductivity of 0.109 W/mK and a mass loss during flammability test of 1.421%. Formula B has a thermal conductivity of 0.103 W/mK and a mass loss during flammability test of 0.886%. Formula B produces foam with lower thermal conductivity and better physical and mechanical properties than formula A. However, formula B experiences a higher mass loss during flammability testing than formula A.

Keywords: *black liquor, lignin isolation, optimization, rigid polyurethane foam*

@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.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2025
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.



OPTIMASI FORMULA PEMBUATAN BUSA POLIURETAN KAKU BERBASIS LIGNIN DARI LINDI HITAM SEBAGAI INSULATOR TERMAL

NAUROTUL HUSNA

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister pada
Program Studi Ilmu dan Teknologi Hasil Hutan

**PROGRAM STUDI ILMU DAN TEKNOLOGI HASIL HUTAN
FAKULTAS KEHUTANAN DAN LINGKUNGAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



@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.



Judul Tesis : Optimasi Formula Pembuatan Busa Poliuretan Kaku Berbasis Lignin dari Lindi Hitam sebagai Insulator Termal

Nama : Naurotul Husna

NIM : E2501231010

@Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr. Ir. Wasrin Syafii, M.Agr.

Pembimbing 2:

Prof. Dr. Ir. Deded Sarip Nawawi, M.Sc.F.Trop.

Pembimbing 3:

Maya Ismayati, Ph.D.

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

Prof. Dr. Ir. Wayan Darmawan, M.Sc.

NIP. 196602121991031002

Dekan Fakultas Kehutanan dan Lingkungan:

Prof. Dr. Ir. Naresworo Nugroho, MS.

NIP. 196501221989031002



@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.

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Januari 2023 sampai bulan Oktober 2024 ini ialah pembuatan busa poliuretan kaku berbasis lignin, dengan judul “Optimasi Formula Pembuatan Busa Poliuretan Kaku Berbasis Lignin dari Lindi Hitam sebagai Insulator Termal”.

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing, Prof. Dr. Ir. Wasrin Syafii, M.Agr., Prof. Dr. Ir. Deded Sarip Nawawi, M.Sc.F.Trop., dan Ibu Maya Ismayati, Ph.D. yang telah membimbing dan banyak memberi saran selama proses penelitian dan penyusunan karya ilmiah. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Ibu Nissa Nurfajrin Solihat, M.Sc. selaku pembimbing saat penulis di jenjang S1, Dr. Ir. Rita Kartika Sari selaku moderator seminar serta penguji luar komisi pembimbing, dan Ibu Dr. Arinana, S.Hut., M.Si. selaku ketua sidang pada ujian akhir magister penulis. Di samping itu, terimakasih penulis sampaikan kepada PT Djarum Foundation yang telah membantu pendanaan studi dan Pusat Riset Biomassa Bioproduk, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang telah memberikan izin dan fasilitas kepada penulis selama kegiatan penelitian. Terimakasih juga penulis sampaikan kepada seluruh peneliti, asisten peneliti, serta staf Pusat Riset Biomassa dan Bioproduk BRIN yang telah memberikan arahan dan bantuan selama proses penelitian. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada orang tua penulis yaitu Bapak Suhadi dan Ibu Rodliyah, kakak penulis yaitu Muhammad Fashih Hibatul Haqqi, dan adik penulis yaitu Muhammad Fatih Fadlul Aziz yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayangnya selama proses penyusunan karya ilmiah ini. Di samping itu, penulis juga menyampaikan terimakasih kepada teman-teman program studi Ilmu dan Teknologi Hasil Hutan, khususnya teman-teman program *fast track* yang telah berjuang bersama dan memberikan bantuan selama proses penyusunan karya ilmiah.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Januari 2025

Naurotul Husna

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan 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.



@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.

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Lignin	4
2.2 Busa Poliuretan Kaku	5
2.3 Busa Poliuretan Kaku Berbasis Lignin	7
III METODE	8
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	8
3.2 Alat dan Bahan	8
3.3 Prosedur Kerja	8
3.3.1 Persiapan Bahan Baku	9
3.3.2 Analisis Komponen Lignin dengan Py-GCMS	11
3.3.3 Pembuatan Busa Poliuretan Kaku	11
3.3.4 Penelitian Pendahuluan	12
3.3.5 Proses Optimasi	12
3.3.6 Karakterisasi Formula Terbaik	14
3.3.7 Analisis Data	15
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	16
4.1 Karakterisasi Lignin	16
4.2 Penelitian Pendahuluan	19
4.2.1 Analisis SEM	20
4.2.2 Analisis Py-GCMS	21
4.2.3 Analisis Termogravimetri (TGA)	23
4.3 Optimasi Formula	24
4.3.1 Penentuan variabel dummy dan Hasil Eksperimen	24
4.3.2 Uji Asumsi Residual dan Kesesuaian Model Regresi	25
4.3.3 Transformasi <i>Box-Cox</i> Model Regresi	28



4.3.4	Analisis respon Kehilangan massa saat proses pengujian <i>flammability</i>	30
4.3.5	Analisis respon konduktivitas termal	31
4.3.6	Penentuan Formula Optimum Pembuatan Busa Poliuretan Kaku	32
4.4	Karakterisasi Formula Terbaik	33
4.4.1	Klasifikasi busa poliuretan berdasarkan pengujian <i>flammability</i>	33
4.4.2	Waktu krim, waktu gelatinasi, waktu pengembangan, dan waktu bebas lengket	34
4.4.3	Kerapatan Busa Poliuretan Kaku	35
4.4.4	Kekuatan tekan	35
4.4.5	Modulus of Elasticity (MOE) dan Modulus of Rupture (MOR)	36
	SIMPULAN DAN SARAN	37
5.1	Simpulan	37
5.2	Saran	37
	DAFTAR PUSTAKA	38
	LAMPIRAN	48
	RIWAYAT HIDUP	56

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	Taraf kode dan aktual pada 3 faktor perlakuan pada rancangan d-optimal	13
2	Rancangan percobaan pembuatan busa poliuretan kaku dengan d-optimal	13
3	Komponen kimia lignin	16
4	Produk pirolisis lignin	18
5	Interpretasi hasil Py-GCMS busa poliuretan kaku dengan berbagai	21
6	Tiga tahap penurunan massa busa poliuretan kaku berdasarkan hasil analisis termogravimetri	23
7	Data faktor, kode <i>dummy</i> , dan hasil respon pada proses optimasi	25
8	Hasil uji validasi busa poliuretan kaku dengan formula optimum yang dihasilkan	32
9	Kerapatan busa poliuretan kaku dengan formula A dan formula B	35
10	Kekuatan tekan busa poliuretan kaku dengan formula A dan formula B	35

DAFTAR GAMBAR

1	Monomer penyusun lignin (a) p-kumaril alcohol (p-hidroksifenil), (b) koniferil alcohol (guaiasil), dan (c) sinapil alcohol (siringil)	4
2	Struktur sel tertutup (a) dan terbuka (b) pada busa poliuretan (Tiuc <i>et al.</i> 2022)	6
3	Reaksi antara isosianat dengan poliol membentuk gugus uretan	6
4	<i>Blowing reaction</i> antara air dan isosianat: (a) Tahap primer (b dan c) tahap sekunder	7
5	Prosedur penelitian	9
6	Pelarut NaOH (a), DMF (b), DMSO (c), dan THF (d) sebagai pelarut lignin pada proses pembuatan busa poliuretan kaku	20
7	Morfologi permukaan busa dengan pelarut DMF (a), DMSO (b),	20
8	Pirogram busa poliuretan kaku dengan pelarut DMF, DMSO, dan THF	21
9	Busa poliuretan kaku dengan formula 1-17	25
10	Q-Q plot normalitas residual respon penurunan massa saat pengujian <i>flammability</i> (a) dan konduktivitas termal (b)	27
11	Kurva <i>log-likelihood</i> respon penurunan massa saat pengujian <i>flammability</i> (a) dan konduktivitas termal (b)	29
12	Q-Q plot normalitas residual respon penurunan massa saat pengujian <i>flammability</i> (a) dan konduktivitas termal (b) setelah transformasi <i>box-cox</i>	29
13	Grafik kontur plot respon kehilangan massa saat pengujian <i>flammability</i>	30
14	Grafik kontur plot respon konduktivitas termal	31
15	Sampel uji validasi busa poliuretan kaku menggunakan pelarut DMF (a) dan DMSO (b) dengan konsentrasi lignin 13,252% dan nisbah MDI:lignin 4,094:1	32
16	Pengujian <i>flammability</i> busa poliuretan kaku dengan formula A	33
17	Pengujian <i>flammability</i> busa poliuretan kaku dengan formula B	33

18	Waktu krim, waktu gelatinasi, waktu pengembangan, dan waktu bebas rekat busa poliuretan kaku dengan formula A dan formula B	34
19	MOE dan MOR busa poliuretan kaku dengan formula A dan formula B	36

DAFTAR LAMPIRAN

1	Lampiran 1 Perhitungan kadar air lignin, rendemen, kadar abu lignin, ASL dan AIL	48
2	Lampiran 2 Sintaks proses optimasi dengan <i>software R-Studio</i>	49
3	Lampiran 3 Analisis data hasil karakterisasi dengan SPSS	55