



SINTESIS DAN APLIKASI NANOLIGNIN PHOSPHORUS SEBAGAI *FILLER* TAHAN API PEREKAT UREA FORMALDEHIDA KAYU LAPIS

DEWI SHAFI KAYLA



PROGRAM STUDI ILMU DAN TEKNOLOGI HASIL HUTAN
FAKULTAS KEHUTANAN DAN LINGKUNGAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026

- 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 mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

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.



PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Sintesis dan Aplikasi Nanolignin Phosphorus Sebagai *Filler* Tahan Api Perekat Urea Formaldehida Kayu Lapis” 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, Juni 2026

Dewi Shafa Kayla
E2501241013



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

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

DEWI SHAFKA KAYLA. Sintesis dan Aplikasi Nanolignin Phosphorus sebagai *Filler* Tahan Api Perekat Urea Formaldehida Kayu Lapis. Dibimbing oleh DEDED SARIP NAWAWI, WIDYA FATRIASARI, DAN MAHDI MUBAROK.

Modifikasi lignin dengan P_2O_5 dan transformasi ke ukuran nano menghasilkan material dengan luas permukaan lebih besar, ikatan polimer lebih kuat, dan distribusi merata yang meningkatkan sifat mekanis, serta stabilitas termal. Nanolignin terfosforilasi berpotensi sebagai aditif tahan api pembentuk lapisan arang dan *scavenger* pengurang emisi formaldehida. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi sintesis optimal nanolignin *Eucalyptus sp.* termodifikasi fosfor pentoksida, karakteristik perekat UF yang dimodifikasi dengan nanolignin terfosforilasi, dan sifat kayu lapis yang dihasilkan termasuk ketahanan api dan emisi formaldehida. Lignin terfosforilasi disintesis menjadi nanolignin terfosforilasi dan diaplikasikan sebagai *filler* aditif tahan api rendah emisinya dengan perekat UF pada kayu lapis berbahan dasar kayu Jabon. Lignin terfosforilasi dan lignosulfonat terfosforilasi dianalisis berat ekuivalen, PyGCMS, dan NMR. Nanolignin terfosforilasi dikarakterisasi ukuran partikel, zeta potensial, FTIR, dan FE-SEM. Karakter perekat UF dianalisis kadar padatan, pH, densitas, gel time, rheometer, emisi formaldehida, FTIR, XRD, TGA, DSC, TEM, dan mikroskop. Kayu lapis UFNLP dikarakterisasi fisis (kerapatan, kadar air, dan delaminasi), dan mekanis (keteguhan rekat dan kerusakan kayu). Karakteristik lignin terfosforilasi yaitu berat ekuivalen 1674,44, rasio S/G 1,11, dan ^{13}C NMR mengonfirmasi keberhasilan fosforilasi melalui peningkatan gugus alifatik primer-OH dan penurunan gugus metoksi yang mengindikasikan demetilasi parsial selama proses fosforilasi. Penelitian ini menghasilkan ukuran partikel nanolignin terfosforilasi 382,5 nm, zeta potensial $-39,8$ mV, berbentuk bulat oval, dan tidak terjadi perubahan gugus fungsi dengan intensitas puncak spektrum tinggi. Penambahan *filler* NLP membentuk ikatan hidrogen yang meningkatkan sifat dan kinerja perekat, termasuk peningkatan kadar padatan, densitas, viskositas, reaktivitas, kekuatan kohesi yang lebih besar, dan emisi formaldehida rendah. Penambahan NLP tidak mengubah gugus fungsi perekat UF, tetapi menurunkan kristalinitas dan membentuk struktur morfologi dengan partikel bulat kecil dan terdispersi merata. Perekat UFNLP memiliki distribusi permukaan paling homogen, ukuran *droplet* lebih kecil, dan penyebaran merata dibandingkan dengan formulasi lain. Sifat termal perekat UFNLP memiliki persen residu pembakaran dan nilai Tg yang tinggi. Kayu lapis UFNLP memiliki kerapatan tinggi, kadar air rendah, keteguhan rekat dan kerusakan kayu optimal, namun delaminasi belum memenuhi standar JAS No. 233 2003. Ketahanan api kayu lapis UFNLP lebih tinggi dibandingkan dengan kontrol dan mencapai kriteria V-0 pada uji UL-94. Hasil uji *torch* gas kayu lapis UFNLP juga memiliki persen kehilangan berat rendah. Berdasarkan hal tersebut nanolignin terfosforilasi berpotensi sebagai *filler* aditif tahan api rendah emisinya.

Kata kunci: *filler* aditif tahan api, nanolignin terfosforilasi, perekat rendah emisi

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.



@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.

SUMMARY

DEWI SHAFKA KAYLA. Synthesis and Application of Nanolignin Phosphorus as a Fire-Resistant Filler for Plywood Urea Formaldehyde Adhesive. Supervised by DEDED SARIP NAWAWI, WIDYA FATRIASARI, AND MAHDI MUBAROK.

Modification of lignin with P_2O_5 and transformation to nano-sized produced material with greater surface area, stronger polymer bonds, and uniform distribution that improve mechanical properties and thermal stability. Phosphorylated nanolignin has the potential to serve as both a flame-retardant additive that forms a char layer and a formaldehyde emission scavenger. This research aimed to analyze the optimal synthesis conditions of *Eucalyptus sp.* nanolignin modified with phosphorus pentoxide, the characteristics of UF adhesives modified with phosphorylated pentoxide, and the properties of the resulting plywood, including fire resistance and formaldehyde emissions. Phosphorylated lignin was synthesized into phosphorylated nanolignin and applied as a flame-retardant additive filler with UF adhesive in plywood made from Jabon wood. Lignophosphorylated and phosphorylated lignosulfonate were further analyzed using equivalent weight, PyGCMS, and NMR. Phosphorylated nanolignin was characterized by particle size, zeta potential, FTIR, and FE-SEM. The characteristics of UF adhesive were analyzed using solid content, pH, density, gel time, rheometer, formaldehyde emission, FTIR, XRD, TGA, DSC, TEM, and microscopy. UFNLP plywood was characterized physically (density, moisture content, and delamination) and mechanically (bond strength and wood damage). Further characteristics of phosphorylated lignin include an equivalent weight of 1674.44, S/G ratios of 1.11, and ^{13}C NMR, which confirms the success of phosphorylation through an increase in primary aliphatic -OH groups and a decrease in methoxy groups, indicating partial demethylation during the phosphorylation process. This research produced phosphorylated nanolignin with a particle size of 382.5 nm, a zeta potential of -39.8 mV, an oval spherical shape, and no change in functional groups, exhibiting high peak intensity in the spectrum. The addition of NLP filler induced hydrogen bonding reactions, which improved adhesive properties and performance, including increased solid content, density, viscosity, reactivity, and greater cohesive strength, as well as reduced formaldehyde emission. The addition of NLP did not alter the functional groups of the UF adhesive; however, it decreased crystallinity and formed a morphological structure with small, diffuse spherical particles that were dispersed uniformly. Microscopic observation of UFNLP adhesives showed the most homogeneous surface distribution, smaller droplet size, and uniform dispersion compared to other formulations. The thermal properties of UFNLP adhesives exhibited a high combustion residue percentage and a high Tg value. UFNLP plywood had a high density, low moisture content, and optimal bond strength, but the delamination has not yet met the JAS No. 233 2003 standard. The fire resistance of UFNLP plywood was higher than that of the control and achieved a value of V-0 rating in the UL-94 test. Torch gas test results also showed that UFNLP plywood had a low weight loss percentage. Based on these findings, phosphorylated nanolignin demonstrated potential as a low-emission flame-retardant additive filler.

Keywords: flame retardant filler, low-emission adhesive, phosphorylated nanolignin



@Hak cipta milik IPB University

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 2026
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.



SINTESIS DAN APLIKASI NANOLIGNIN PHOSPHORUS SEBAGAI *FILLER* TAHAN API PEREKAT UREA FORMALDEHIDA KAYU LAPIS

DEWI SHAFKA KAYLA

Tesis

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

**PROGRAM STUDI ILMU DAN TEKNOLOGI HASIL HUTAN
FAKULTAS KEHUTANAN DAN LINGKUNGAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@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.

Tim Penguji pada Ujian Tesis:

Prof. Dr. Ir. Dede Hermawan, M.Sc.F.Trop.



Judul Tesis : Sintesis dan Aplikasi Nanolignin Phosphorus sebagai *Filler* Tahan Api Perekat Urea Formaldehida Kayu Lapis
Nama : Dewi Shafa Kayla
NIM : E2501241013

@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.

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

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

Pembimbing 2:

Prof. Dr. Widya Fatriasari, S.Hut., MM

Pembimbing 3:

Dr. Mahdi Mubarak, S.Si., M.Si.

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

Prof. Dr. Ir. I Wayan Darmawan, M.Sc.F.Trop

NIP 196602121991031002

Dekan Fakultas Kehutanan dan Lingkungan:

Prof. Dr. Ir. Dodik Ridho Nurrochmat, M.Sc.F.Trop

NIP 197003291996081001



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

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 sampai bulan Oktober 2025 ini ialah pengujian karakteristik nanolignin termodifikasi menggunakan fosfor pentoksida dan karakteristik perekat urea formaldehida sebagai aditif tahan api dengan judul “Sintesis dan Aplikasi Nanolignin Phosphorus sebagai *Filler* Tahan Api Perekat Urea Formaldehida Kayu Lapis”.

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing Bapak Prof. Dr. Ir. Deded Sarip Nawawi, M.Sc., Ibu Prof. Dr. Widya Fatriasari, S.Hut, M.M, dan Bapak Dr. Mahdi Mubarak, S.Si., M.Si. yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada pembimbing akademik, moderator seminar, dan penguji luar komisi pembimbing. Di samping itu, penghargaan penulis sampaikan kepada pihak Manajemen Talenta BRIN melalui program *Research Assistant* (RA), E-Layanan Sains (ELSA) Poin, dan ELSA *Service facility*. Penghargaan juga disampaikan kepada Pusat Riset Biomassa dan Bioproduk (PRBB) yang telah memberi dukungan melalui *Research Collaboration of Nanotechnology and Materials 2025* dengan Nomor Kontrak 2/III.10/HK/2025, manajemen *Integrated Laboratory of Bioproduct* (iLab) Cibinong, Laboratorium Karakterisasi Kimia Maju, dan Laboratorium Polimer Tangerang Selatan yang telah memfasilitasi penulis selama penelitian. Penulis juga mengucapkan rasa terima kasih kepada Teh Rima, Teh Elvara, Mas Eko, Kang Rasyid, Pak Manto, Aras, Pirda, Teh Kharen, Teh Sulhida yang telah membantu selama pengumpulan data dan pengolahan data. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada bapak Shofin Hudi, ibu Tatik Rusmawati, M. Saylendra Wijaya Kusuma, Moh. Oscar Abbas, serta seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayangnya kepada penulis. Penulis juga mengucapkan rasa terima kasih kepada teman penulis, Ika, Pera, Pelangi, Berli, Cyintia, Fiony, Lilih, Salahudin, Azizah atas dukungan dan semangatnya. Terima kasih juga penulis ucapkan kepada teman seperjuangan Sinergi DHH 57, teman-teman Laboratorium Kertas Kering, teman-teman DHH 57, serta pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan karya ilmiah ini. Namun penulis berharap semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Bogor, Juni 2026

Dewi Shafa Kayla



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

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	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Lignin Modifikasi sebagai Aditif Tahan Api	4
2.2 Nanolignin sebagai <i>Filler</i> pada Kayu Lapis	5
2.3 Modifikasi Perkat Urea Formaldehida dengan <i>Filler</i> Nanolignin	7
III METODE	8
3.1 Waktu dan Tempat	8
3.2 Alat dan Bahan	8
3.3 Prosedur Kerja	8
3.4 Analisis Data	16
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	17
4.1 Berat Ekuivalen Lignin Terfosforilasi	17
4.2 Rasio S/G Lignin Terfosforilasi	18
4.3 <i>Nuclear Magnetic Resonance</i> Lignin Terfosforilasi	20
4.4 Mekanisme Reaksi Lignin Terfosforilasi	22
4.5 Ukuran Partikel dan Morfologi Nanolignin Terfosforilasi	24
4.6 Gugus Fungsi Nanolignin Terfosforilasi	25
4.7 Karakteristik Perkat UF Termodifikasi Nanolignin Terfosforilasi	27
4.8 Mekanisme Reaksi UF Termodifikasi Nanolignin Terfosforilasi	29
4.9 Emisi Formaldehida UF Termodifikasi Nanolignin Terfosforilasi	30
4.10 Karakteristik Kayu Lapis	31
4.11 Gugus Fungsi Perkat UF Nanolignin Terfosforilasi	36
4.12 Kristalinitas Perkat UF Nanolignin Terfosforilasi	37
4.13 Morfologi Perkat UF Nanolignin Terfosforilasi dengan TEM	39
4.14 Morfologi Permukaan Perkat UF Nanolignin Terfosforilasi	40
4.15 Sifat Termal Perkat UF Nanolignin Terfosforilasi	42
4.16 Analisis DSC Perkat UF Nanolignin Terfosforilasi	44
4.17 Sifat Ketahanan Api pada Kayu Lapis Lignin Termodifikasi	45
V SIMPULAN DAN SARAN	47
5.1 Simpulan	47
5.2 Saran	47
DAFTAR PUSTAKA	48
LAMPIRAN	64
RIWAYAT HIDUP	72



DAFTAR TABEL

1	Perkembangan studi pemanfaatan material nanolignin sebagai pengisi dalam perekat UF	7
2	Perlakuan kayu lapis dengan lignin termodifikasi fosfor dan nanolignin terfosforilasi sebagai aditif tahan api	15
3	Parameter dan standar pengujian kayu lapis	15
4	Berat ekuivalen lignin terfosforilasi dan lignosulfonat terfosforilasi	17
5	Produk pirolisis lignin terfosforilasi	18
6	Produk pirolisis lignosulfonat terfosforilasi	19
7	Jumlah integrasi akhir analisis ¹³ C NMR lignin termodifikasi	22
8	Ukuran partikel nanolignin terfosforilasi	24
9	Interpretasi pita serapan FTIR nanolignin terfosforilasi	26
10	Karakteristik perekat UF berbasis NLP	28
11	Emisi formaldehida pada kayu lapis lignin termodifikasi	31
12	Karakteristik kayu lapis UF-nanolignin secara <i>in-situ</i> dan <i>ex-situ</i>	35
13	Interpretasi pita serapan FTIR perekat UF termodifikasi nanolignin terfosforilasi pada cair dan padat	37
14	Kristalinitas perekat UF berbasis NLP	39
15	Kehilangan berat pada perekat UF berbasis NLP	44
16	Nilai transition glass (Tg) pada perekat UF berbasis NLP	45
17	Pengujian sifat tahan api pada kayu lapis menggunakan UL-94	45
18	Pengujian sifat tahan api pada kayu lapis menggunakan <i>torch</i> gas	46

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.

DAFTAR GAMBAR

1	(a) struktur lignin dan tiga prekursor utama lignin (Rauber <i>et al.</i> 2017); (b) tiga prekursor utama lignin dan strukturnya dalam polimer lignin (Laurichesse dan Avérous 2014)	4
2	Diagram alir penelitian	9
3	Proses sintesis nanolignin terfosforilasi	11
4	Proses sintesis perekat urea formaldehida-nanolignin terfosforilasi	12
5	Spektra Py-GCMS lignin termodifikasi	20
6	Spektra ¹³ C NMR lignin termodifikasi	21
7	Mekanisme reaksi lignin dan fosfor pentoksida melalui ikatan fosfoester	23
8	Mekanisme reaksi lignosulfonat dan fosfor klorida melalui ikatan fosfoester	23
9	Pengamatan stabilitas nanolignin terfosforilasi selama 30 hari (0,1%)	25
10	Morfologi dan ukuran partikel nanolignin terfosforilasi (a) dan lignin terfosforilasi (b)	25
11	Analisis gugus fungsi spektrum FTIR pada nanolignin terfosforilasi	27
12	Kenampakan perekat UF kontrol (a), UF-lignosulfonat terfosforilasi (b), UF-lignin terfosforilasi (c), UF-nanolignin terfosforilasi (d)	28
13	Mekanisme reaksi NLF dan oligomer UF melalui ikatan hidrogen	30
14	Kerapatan kayu lapis dari perekat UF, UF-lignosulfonat terfosforilasi, UF-lignin terfosforilasi, dan UF-nanolignin terfosforilasi	32
15	Kadar air kayu lapis dari perekat UF, UF-lignosulfonat terfosforilasi, UF-lignin terfosforilasi, dan UF-nanolignin terfosforilasi	32
16	Garis rekat delaminasi kayu lapis dengan perekat UF, UF-lignosulfonat terfosforilasi, UF-lignin terfosforilasi, dan UF-nanolignin terfosforilasi	33
17	Delaminasi kayu lapis dari perekat UF, UF-lignosulfonat terfosforilasi, UF-lignin terfosforilasi, dan UF-nanolignin terfosforilasi	33
18	Keteguhan rekat kayu lapis dari perekat UF, UF-lignosulfonat terfosforilasi, UF-lignin terfosforilasi, dan UF-nanolignin terfosforilasi	34
19	Serat kayu yang tertarik dan menempel pada permukaan garis rekat akibat kerusakan kayu perekat UF, UF-lignosulfonat terfosforilasi, UF- lignin terfosforilasi, dan UF-nanolignin terfosforilasi	35
20	Kerusakan kayu lapis dari perekat UF, UF-lignosulfonat terfosforilasi, UF-lignin terfosforilasi, dan UF-nanolignin terfosforilasi	35
21	Analisis gugus fungsi spektrum FTIR pada perekat UF berbasis NLP, (a) perekat sebelum <i>curing</i> , (b) perekat setelah <i>curing</i>	36
22	Analisis XRD perekat UF berbasis NLP	38
23	Citra TEM perekat dengan perbesaran 36000×, UF (a), UFLsP (b), UFLP (c), dan UFNLP (d)	40
24	Morfologi permukaan perekat pada vinir dengan perbesaran 200×, UF (a), UFLsP (b), UFLP (c), dan UFNLP (d), skala 100 μm	41



DAFTAR GAMBAR (lanjutan)

25	Citra AFM morfologi permukaan berdasarkan pola topografi 3D dari perekat dengan perbesaran 200×, UF (a), UFLsP (b), UFLP (c), dan UFNLP (d), skala 100 μm	42
26	Analisis TGA (a) dan DTG (b) pada perekat UF berbasis NLP	43

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



DAFTAR LAMPIRAN

1	Contoh perhitungan	65
2	Analisis statistika dengan one-factor ANNOVA dan uji Duncan	66
3	Dokumentasi kegiatan penelitian	70
4	Bagan alir penelitian	71

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.