

Perluasan Kinerja Akustik Limbah Kayu Batang Kelapa Sawit Termodifikasi Bahan Formaldehida

Expanding of Acoustic Performance of Oil Palm Trunk Waste Modified Formaldehyde

Tetti Novalina Manik^{a*}, Shaliha^a, Simon Sadok Siregar^a, Tanto Budi Santoso^b, Iwan Yahya^c, Mashuri^d,
Muhammad Zainuri^d, dan Darminto^d

^aProgram Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lambung
Mangkurat, Banjarbaru, Kalimantan Selatan 70714, Indonesia

^bProgram Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lambung
Mangkurat, Banjarbaru, Kalimantan Selatan 70714, Indonesia

^cDepartemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sebelas Maret,
Surakarta, Indonesia

^dDepartemen Fisika, Fakultas Sains dan analisis Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
60111, Sukolilo, Indonesia

*Email: tetti.manik@ulm.ac.id

(Diterima 04 Juli 2022; Disetujui 28 Oktober 2022; Dipublikasikan 30 November 2022)

Abstrak

Pemanfaatan limbah kayu batang kelapa sawit (BKS) sebagai material akustik telah dilakukan dengan modifikasi kimia. Modifikasi ini dilakukan dalam dua tahap, yaitu formalisasi dengan bahan formaldehida, dilanjutkan dengan impregnasi dengan resin melamine-formaldehida. Formalisasi dilakukan dalam kondisi pH 10, dengan lama waktu formalisasi 3 hari dan 5 hari. Impregnasi dilakukan pada tekanan 3 bar dan 5 bar di tahan 1 jam pada suhu kamar. Modifikasi diakhiri dengan proses *curing* pada suhu 120°C ditahan selama 10 menit dan pengeringan dalam oven pada suhu (103±2)°C hingga mencapai kadar air kurang dari atau mendekati 6%, untuk diaplikasikan sebagai material akustik. Modifikasi ini telah mengubah komposisi kimia dan struktur kayu yang ditunjukkan oleh hasil FTIR dan SEM. Kayu menjadi lebih padat, kuat dan kaku. Sifat stabilitas dimensi kurang dari 1% sehingga tidak menyusut atau membengkak terhadap kondisi lingkungan. Densitas, MOE dan MOR kayu BKS juga meningkat. Koefisien penyerapan bunyi kayu BKS menurun dengan peningkatan waktu formalisasi dan tekanan impregnasi. Berdasarkan tren koefisien penyerapan bunyi, kayu BKS dapat diaplikasikan sebagai penyerap resonansi dengan kelas kerja dari kelas A, B, dan D.

Kata kunci: formalisasi, impregnasi, melamine-formaldehida, penyerap resonansi

Abstract

Chemical modifications for waste oil palm trunks had carried out as acoustic material. This modification was conducted in two stages. Firstly, formalization with formaldehyde solution and secondly is impregnation with melamine-formaldehyde resin. Formalization was conducted in alkaline condition (pH 10) for 3 days and 5 days. Impregnation was carried out under pressure 3 bar and 5 bar and held for an hour. For completed these modification, the samples was cured at 120°C for 10 minutes and then dried at (103±2)°C to reached moisture content of less than 6%. This modification has changed the chemical structure and the morphology of wood, as shown by the FTIR and SEM results. The samples became denser, stronger and more rigid. Furthermore, the mechanical and physical properties of modified wood are also increasing. The absorption coefficient decreases with increasing formalization time and impregnation pressure. Based on trend of absorption coefficient, BKS wood can be applied as resonant absorber with work class from A to class B and D.

Keywords: formalization, impregnation, melamine-formaldehyde, resonant absorber

1. Latar Belakang

Riset bidang sawit telah menjadi topik hangat di Indonesia saat ini, dan salah satu topiknya adalah penanganan limbahnya. Indonesia memiliki luas

perkebunan kelapa sawit nomor satu di dunia, dengan kapasitas produksi mencapai 31,10 juta ton per tahun [1] dengan luas hutan sawit pada tahun 2021 sekitar 15,08 juta ha. Luas ini terus



Gambar 1. Perkebunan sawit usia lebih 30 tahun.

meningkat, dimana tahun 2019 dan tahun 2020 luas perkebunan sawit sekitar 14,45 juta Ha dan 14,86 juta Ha [2]. Melihat data-data ini, jumlah limbah pohon kelapa sawit produktif menjadi sangat banyak. Limbah pelepah sawit dan tandan kosong diproduksi per sepuluh hari, sedangkan limbah gelondongan batang kelapa sawit (BKS) diperoleh setelah sawit berusia 25-30 tahun. Dengan demikian perlu dilakukan penanganan limbah sawit ini. Khusus limbah gelondongan BKS, akan sangat melimpah saat memasuki masa *replanting*, yaitu saat sawit berusia 25-30 tahun (Gambar 1). *Replanting* atau peremajaan adalah masa penanaman pohon kelapa sawit baru. Jika dalam 1 ha lahan sawit terdapat 136-160 batang pohon [3] dapat diperkirakan jumlah limbah ini dalam satu kali masa *replanting*.

Selama ini, limbah gelondongan BKS hanya dibakar lalu disusun di sela tanaman sawit baru atau dicacah-cacah kemudian ditanam disekitar pohon kelapa sawit baru. Penanganan limbah seperti ini menimbulkan polusi udara dan serangan hama wawung terhadap tanaman sawit baru.

Pemanfaatan limbah gelondongan kayu BKS masih sangat terbatas, karena kayu ini tergolong kayu kualitas rendah, sifat higroskopis tinggi, kandungan polisakarida tinggi dan stabilitas dimensi rendah [4]. Namun limbah kayu BKS ini masih berpotensi untuk menjadi material tepat guna, jika diberi perlakuan padanya. Penelitian ini melakukan rekayasa atau modifikasi pada struktur kayu BKS untuk meningkatkan kinerja limbah kayu ini.

Memodifikasi struktur kayu BKS dengan bahan polimer atau bahan kimia tertentu telah meningkatkan kinerja dari BKS kering (sebelum perlakuan). Modifikasi dengan mengimpregnasi bahan polimer seperti: urea-formaldehida (UF) [5-7], fenol-formaldehida (PF) [6] atau melamin-formaldehida (MF) [8,9] ke dalam rongga-rongga

kosong pada struktur kayu BKS telah berhasil meningkatkan sifat fisis, mekanik serta memperbaiki struktur kimia dari kayu BKS tersebut. Bahkan, pada beberapa penelitian, saat proses impregnasi sampel, ditambahkan perlakuan tekanan dan atau panas untuk mencapai sifat fisis dan mekanik yang diinginkan. Namun pemanfaatan limbah kayu BKS masih sedikit mendapat perhatian.

Kayu BKS kering dapat dimanfaatkan sebagai material akustik berbahan alam, mengingat ciri khas kayu BKS yaitu berstruktur lunak, berpori, dan berserat. Ciri demikian berpotensi sebagai bahan penyerap suara berpori atau sebagai resonator Helmholtz. Namun untuk meningkatkan kinerjanya perlu memodifikasinya terlebih dahulu [10-12].

Komposit berpenguat serat sintetis disubstitusi serat batang kelapa sawit telah diselidiki sifat akustiknya dan mendapatkan koefisien penyerapan (α) hingga 0,99 [12] dan juga komposit dengan serat BKS dan Matrik UF diperoleh α sebesar 0,8 berdasarkan variasi ketebalan [11]. Papan kayu BKS berbentuk panel-panel bulat dan tipis, dimana salah satu sisi permukaannya diberi lubang-lubang (lubang resonator) telah mendapatkan koefisien penyerapan yang beragam, sesuai dengan variasi kedalaman lubang resonator [10]. Serta kayu BKS diberi perlakuan modifikasi variasi pH formalisasi dan dilanjutkan dengan impregnasi resin MF kedalam rongga/pori kayu telah mendapatkan aplikasi akustik kayu BKS yang baru, yaitu sebagai penyerap resonansi.[8].

Kinerja akustik sebuah material diketahui dari nilai koefisien absorpsi (α), koefisien refleksi (β) dan koefisien transmisi (γ) yang dihasilkan oleh kayu tersebut. Ketiga parameter ini dipengaruhi oleh sifat fisis, mekanik dan viskoelastik dari kayu tersebut [13,14]. Kadar air menyebabkan perubahan ketangguhan kayu dan stabilitas dimensi kayu. Sifat ini penting karena mempengaruhi penyusutan dan pengembangan volume kayu jika terjadi perubahan kondisi lingkungan. Hal ini berdampak pada sifat akustiknya, yaitu fluktuasi nada atau frekuensi. Densitas dan ketahanan mekanik mempengaruhi kecepatan bunyi dan penyerapan bunyi material kayu.[13-15]

Material akustik untuk ruangan, kebanyakan menggunakan bahan-bahan sintetis, seperti *rockwool* dan *glasswool*, dan karpet. Material berpori memiliki kecenderungan menyerap energi

bunyi di daerah frekuensi tinggi. Material membran dimanfaatkan untuk menyerap energi pada frekuensi rendah. Resonator helmholtz digunakan untuk mengendalikan derau frekuensi rendah pita sempit dan material yang permukaan licin, keras dan kaku, digunakan untuk menghasilkan bunyi pantul. [16]

Kayu BKS mentah asal Banjarbaru, sebagai sampel pada penelitian ini, memiliki kadar air rata-rata 107,03% dan densitas rata-rata sekitar 0,36 g/cm³ [9]. Keadaan ini menjadi perlu untuk diatasi terlebih dahulu, karena suatu material akustik harus memiliki kadar air kayu kurang dari atau mendekati 6% [15], untuk dapat mengatasi perubahan suara atau fluktuasi nada akibat perubahan kondisi lingkungan. Densitas kayu sekitar 0,35 - 1,50 g/cm³ [17].

Modifikasi kimia diterapkan pada sampel limbah kayu sebanyak dua tahap, pertama, modifikasi formalisasi dengan larutan formaldehida dan kedua, modifikasi impregnasi dengan Resin MF. Modifikasi ini cukup baik mengatasi kelemahan-kelemahan sifat kayu BKS ini [8]. Modifikasi formalisasi bertujuan untuk mereduksi kandungan lignin dan hemiselulosa pada kayu, menurunkan kadar air dan meningkatkan sifat stabilitas dimensi kayu BKS. Disamping itu, proses formalisasi juga bertujuan untuk meningkatkan sifat adhesivitas antara sel kayu dengan impregnan MF yang akan diberikan, sehingga pembentukan ikatan silang antara polimer kayu dengan resin MF berhasil meningkatkan performansinya.

Modifikasi impregnasi dengan MF bertujuan untuk meningkatkan sifat fisis, mekanik dan akustik limbah kayu BKS tersebut [8,9,18]. Resin MF dipilih sebagai impregnan karena sampel kayu ini akan dimanfaatkan sebagai material akustik ruang. Resin MF merupakan resin amino dan tidak beracun bila digunakan di bawah suhu 100°C, karena formaldehida dalam resin MF akan menguap di atas suhu tersebut [19]. Selain itu resin MF lebih murah dari pada resin PF, memiliki kekerasan dan kekakuan tinggi dan sifat ketahanan air lebih tinggi daripada UF [20,21].

Kombinasi modifikasi formalisasi dan impregnasi telah meningkatkan kinerja akustik BKS kering. Formalisasi dilakukan dengan variasi pH formalisasi, sedangkan impregnasi diatur pada tekanan 5 bar ditahan selama 1 jam dan suhu curing 120°C [8].

Penelitian ini mengembangkan modifikasi kayu BKS tersebut [8] dengan memberi variasi tekanan impregnasi namun pH formalisasi tiap sampel dibuat tetap yaitu pH 10, untuk mengetahui sifat fisis, mekanik dan akustiknya.

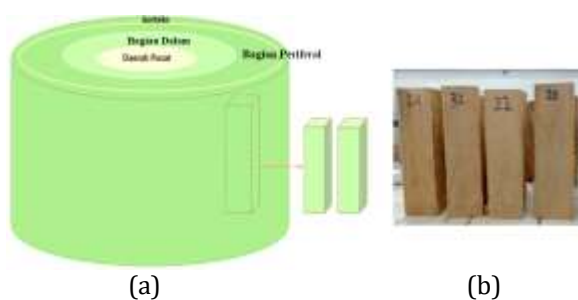
2. Metodologi

Persiapan Sampel

Sampel BKS diambil dari daerah Banjarbaru Kalimantan Selatan Indonesia, berusia lebih dari 30 tahun. Sampel BKS dipilih dari bagian bawah batang pohon yaitu sekitar 1-2 meter dari permukaan tanah, dari bagian batang luar (Gambar 2), diambil dari bagian periferal BKS dan kemudian dipotong-potong dengan dimensi panjang x lebar x tebal adalah (15 × 5 × 5) cm. Semua sampel uji dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C selama 24 jam untuk mencegah penyusutan dilanjutkan dengan pengeringan dalam oven pada suhu (103±2)°C selama 24 jam hingga mencapai kadar air sampel kurang dari 10% untuk siap dimodifikasi [22]. Sampel-sampel kering disimpan pada suhu kamar sebelum diberi perlakuan.

Modifikasi Sampel

Modifikasi dilakukan tanpa merusak dimensi dari log kayu uji. Sebelum proses modifikasi, sampel-sampel dipotong-potong dengan dimensi (15 x 5 x 1) cm agar bahan formalisasi dan impregnan meresap merata keseluruh sel kayu. Modifikasi pertama, sampel-sampel diformalisasi di dalam larutan formalisasi selama 3 dan 5 hari dalam gelas beaker tertutup. Larutan formalisasi dibuat dalam kondisi pH 10. Larutan formalisasi pH 10 ini diperoleh dengan meneteskan sedikit demi sedikit larutan NaOH (3 wt%) ke dalam larutan formadehida (pH 4, 37 wt%) hingga mencapai kondisi pH 10. NaOH berfungsi sebagai katalisator, membantu dalam mengurangi atau menghilangkan kandungan O-H pada lignin, hemiselulosa, dan zat



Gambar 2. (a) Bagian-bagian batang kelapa sawit (b) Spesimen sampel uji.

lilin pada struktur kayu, tanpa merusak selulosa, sehingga meningkatkan sifat kestabilan dan keawetan kayu. Setelah formalisasi, kayu dikering-angin dalam ruang asam selama lebih kurang 10 hari atau sampai kayu BKS tidak berbau. Massa kayu ditimbang sebelum dan setelah perlakuan ini.

Modifikasi kedua adalah impregnasi. Impregnasi kayu dilakukan di dalam mesin *autoclave* yang sudah berisi resin MF. Mesin diatur untuk tekanan 3 bar dan 5 bar dengan masing-masing diatur pada suhu 32°C ditahan selama 1 jam.

Tahap akhir modifikasi adalah proses *curing* yang dilakukan pada suhu 12°C untuk polimerisasi. Dilanjutkan dengan pengeringan sampel dalam oven (103±2)°C hingga mencapai kadar air kurang dari 6% [15].

Perubahan struktur dan morfologi sampel kayu BKS ditunjukkan melalui foto SEM dari alat SEM model EDAX-AMETEK dan spektra FTIR yang diperoleh dari alat FTIR dari Bruker Alpha RT-DLaTGS, dengan metode *Plate Attenuated Total Protection* (ATR) dalam rentang 4000 cm⁻¹ sampai 500 cm⁻¹.

Kadar Air Kayu

Kadar air kayu (KA) adalah banyaknya air yang terkandung dalam kayu yang dinyatakan dalam persen terhadap massa kering oven. Kadar air sampel diukur menggunakan persamaan (1). Massa awal sampel (M_i) ditimbang dengan menggunakan neraca analitik OHAUS dengan ketelitian ± 0,1 g, kemudian dikering oven pada suhu (103±2)°C selama 24 jam. Massa sampel ditimbang kembali (M_o) hingga kadar air mencapai kurang dari atau mendekati 6 %.

$$KA = \frac{M_i - M_o}{M_o} \times 100\% \quad (1)$$

Densitas Kayu

Densitas kayu berhubungan dengan kekuatan kayu. Densitas kayu dipengaruhi oleh susunan sel kayu dan ketebalan dinding sel, dimana semakin tebal dinding sel, semakin besar densitas kayu. Sampel uji dengan dimensi (15 x 5 x 1) cm dipotong menjadi 3 bagian menjadi ukuran (5 x 5 x 1) cm. Dimensi sampel-sampel diukur dengan jangka sorong untuk menghitung volume sampel secara akurat. Massa masing-masing sampel (m) diukur dengan neraca analitik OHAUS dengan ketelitian ±0,1 g. Densitas masing-masing sampel dihitung

menggunakan persamaan (2) sebagai densitas rata-rata (ρ_s).

$$\rho_s = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Uji Pengembangan Volume

Uji pengembangan volume, S (%) atau disebut juga uji stabilitas dimensi, bertujuan untuk mengetahui perubahan dimensi kayu jika kayu uji diletakkan dalam kondisi lingkungan. Perhitungan dilakukan sesuai dengan prosedur standar SNI 03-2105-2006 [23] seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (3).

$$S (\%) = \left(\frac{V_2 - V_1}{V_1} \right) \times 100 \quad (3)$$

dimana V_1 adalah dimensi sampel BKS kering, V_2 adalah dimensi sampel setelah direndam air suling selama 24 jam di dalam gelas *beaker* tertutup.

Sifat Mekanik

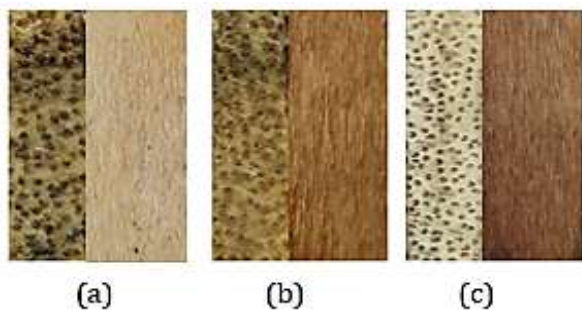
Sifat mekanik sampel BKS diukur dari nilai modulus elastisitas (*Modulus of Elasticity*, MOE) dan modulus patah (*Modulus of Rupture*, MOR) yang diuji dengan menggunakan alat *universal testing machine merk* IBERTEST mengacu pada (SNI 03-3959-1995)

Sifat Akustik

Sifat akustik kayu BKS yang diukur adalah koefisien penyerapan bunyi menggunakan satu set alat tabung impedansi dua mikrofon standar *small tube setup* Brüel & Kjær tipe 4206 tipe 030087 mengacu pada ASTM E-1050-98. Sampel disiapkan dengan diameter 3 cm dan ketebalan 1 cm. Performa akustik diukur dalam rentang frekuensi 500 Hz hingga 6000 Hz.

3. Hasil dan Pembahasan

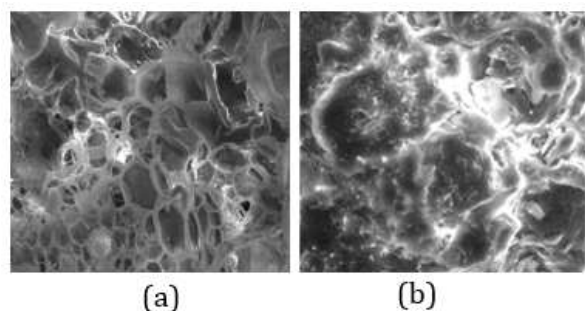
Gambar 3 merupakan sampel kayu BKS uji sebelum modifikasi (a), setelah formalisasi (b) dan setelah modifikasi (c) lengkap. Butiran-butiran gelap pada sebelah kiri masing-masing gambar adalah penampang serat dari sampel BKS jika dilihat dari arah vertikal. Tampak terjadi perubahan warna pada masing-masing sampel setelah modifikasi. Hal ini menunjukkan adanya reaksi yang terjadi antara kimia kayu dengan bahan-bahan pemodifikasi.



Gambar 4. Sampel uji BKS; (a) Sebelum modifikasi (BKS kering), (b) Setelah formalisasi, dan (c) Setelah impregnasi.

Formaldehida dengan katalis NaOH berpotensi untuk bereaksi dengan dua rantai O-H pada dinding sel kayu dan membentuk ikatan silang (Gambar 3b). Ikatan-ikatan silang ini berperan dalam melindungi kayu dari jamur, mengurangi sifat higroskopis, sehingga kayu tidak mudah busuk. Reaksi terakhir dari proses ini adalah penguapan molekul air (H_2O). Peristiwa ini juga mengurangi sifat higroskopis kayu, sehingga meningkatkan sifat stabilitas dimensi kayu. [25,26]. Gambar 3c menunjukkan bahwa resin MF telah mengisi pori-pori kayu dan melapisi dinding sel kayu, sehingga permukaan kayu terlihat lebih licin, keras dan padat (Gambar 3c).

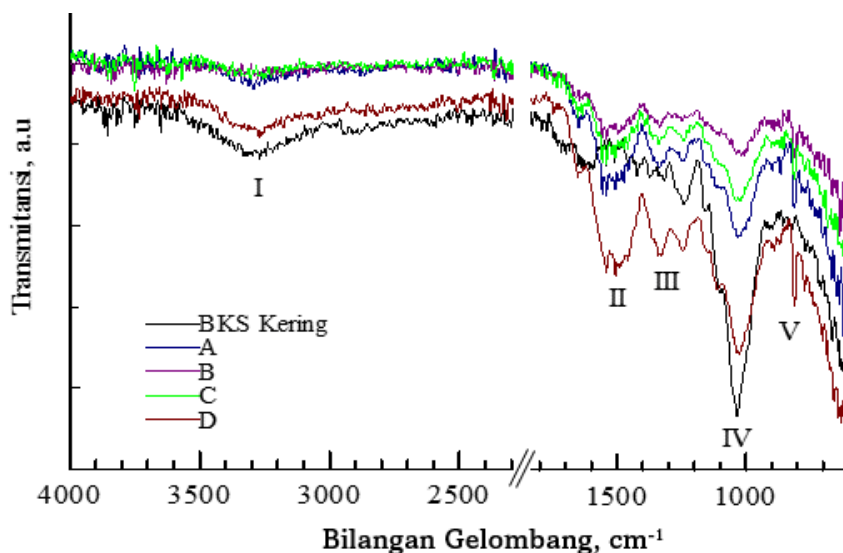
Modifikasi lengkap telah menurunkan kadar air sampel kurang dari 6% dari sebelumnya 107,03%. Hasil ini telah sesuai untuk diaplikasikan sebagai material akustik [15]. Modifikasi lengkap menampilkan kayu tampak lebih padat, keras dan kuat. Hasil ini dikonfirmasi oleh foto SEM kayu BKS sebelum dan setelah modifikasi lengkap, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4. Gambar 4b



Gambar 3. Foto SEM permukaan kayu BKS; (a) BKS kering dan (b) BKS modifikasi.

menunjukkan bahwa impregnan MF telah mengisi sebagian besar rongga-rongga kayu BKS kering dan melapisinya (Gambar 4b). Proses *curing* membentuk ikatan silang antara rantai kimia kayu dan bahan-bahan pemodifikasi dan molekul air di dalam kayu terlepas pada akhir proses, sehingga stabilitas dimensi semakin baik[26]. Rantai ikatan ini ditunjukkan dengan gugus fungsi yang ditunjukkan oleh spektra FTIR pada Gambar 5.

Pada Gambar 5, tampak struktur kimia BKS telah mengalami perubahan secara signifikan setelah modifikasi. Kayu BKS kering terdiri dari puncak 3330 cm^{-1} – 3230 cm^{-1} yang terkait getaran ulur O-H pada lignin, hemiselulosa, dan selulosa penyusun komponen dinding sel [27]. Puncak 1650 cm^{-1} terkait dengan getaran ulur C=C mode aromatik skeletal pada lignin; 1370 cm^{-1} terkait dengan getaran tekuk C-H pada selulosa dan hemiselulosa; 1245 cm^{-1} terkait dengan getaran ulur cincin *syringyl* C-O pada asam karboksilat dalam hemiselulosa dan gugus asetil pada lignin; 1035 cm^{-1} terkait dengan getaran ulur C-O-C, C-H



Gambar 5. Spektra FTIR sampel BKS.

dan O-H pada polisakarida, selulosa dan hemiselulosa dan deformasi C-O; dan 895 cm^{-1} – 746 cm^{-1} terkait dengan aromatik hidrogen C-H.

Puncak dan pita gugus fungsi mengalami perubahan setelah modifikasi, bahkan muncul beberapa gugus fungsi baru akibat modifikasi MF. Puncak pita 3330 cm^{-1} – 3230 cm^{-1} (I) menurun setelah modifikasi, menunjukkan bahwa kandungan O-H pada sampel kering berkurang dan puncak yang ditunjukkan adalah serapan karakteristik amina primer MF dan vibrasi tekuk O-H. Sampel D menunjukkan intensitas transmitansi tertinggi; menunjukkan bahwa resin MF telah terpenetrasi dengan baik dibandingkan dengan sampel A, B dan C. Puncak 1650 cm^{-1} yang terkait dengan cincin aromatik lignin hilang setelah modifikasi. Namun, muncul gugus fungsional baru pada 1550 cm^{-1} - 1540 cm^{-1} (II) yang terkait dengan getaran cincin -C = N dan C-H yang merupakan kelompok cincin metilen dan kelompok Nitro. Peresapan senyawa ini paling besar pada sampel D. Muncul juga puncak 1340 cm^{-1} (III) terkait dengan kelompok metilen dan deformasi polisakarida. Intensitas 1245 cm^{-1} dan 1035 cm^{-1} (IV) berkurang, hal ini menunjukkan bahwa kandungan lignin dan hemiselulosa berkurang setelah modifikasi. Puncak 812 cm^{-1} (V), muncul pada tiap sampel hasil modifikasi. Puncak ini terkait dengan getaran cincin triazin [20,28], yaitu karakteristik daerah serapan sidik jari melamin-formaldehida. Munculnya gugus metilen dan gugus amina serta cincin triazin mengindikasikan bahwa resin MF telah meresapi pori-pori pada kayu BKS. Berkurang dan hilangnya intensitas transmitansi menunjukkan berkurangnya komponen lignin dan hemiselulosa pada kayu BKS setelah modifikasi. Dengan demikian kandungan O-H dan zat lilin pada kayu telah berkurang, sehingga sifat higroskopis kayu berkurang. Berdasarkan intensitas transmitansi spektra FTIR tampak bahwa perlakuan sampel kayu D, impregnan MF lebih meresap pori dan dinding kayu BKS.

Hasil SEM dan FTIR ini dikonfirmasi dengan hasil pengukuran sifat fisis dan mekanik sampel BKS, seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 1 dan Tabel 2. Pemilihan resin MF sebagai matriks memberi pengaruh signifikan terhadap peningkatan sifat fisis dan mekanik sampel kayu. Sifat-sifat resin MF keras dan kaku, dengan densitas dan viskositas pada 30°C sebesar $1,244\text{ g/cm}^3$ dan 40 cPs telah berhasil meningkatkan kinerja kayu BKS kering.

Modifikasi telah menurunkan kadar air kayu (KA) yaitu kurang dari 6% [15] dan kestabilan dimensi (S) kurang dari 12% untuk aplikasi kayu lunak (*soft board*) dan 2,3% jika peruntukan kayu musik (*soundboard*) [29]. Berdasarkan kedua nilai tersebut, kayu BKS telah tahan terhadap kondisi lingkungan. Nilai kadar air dan kestabilan dimensi ini lebih kecil dari BKS dimodifikasi dengan UF dengan waktu impregnasi yang sama, yaitu 1 jam [6]. Densitas kayu BKS (ρ) semua sampel meningkat dengan meningkatnya waktu formalisasi dan tekanan impregnasi. Termasuk dalam kelas kayu 2 [30] dan layak sebagai aplikasi akustik [17]. Demikian juga hasil MOR dan MOE (Tabel 2), terjadi peningkatan dari sampel tanpa perlakuan. Peningkatan sifat fisis dan mekanik lebih dari seratus persen. MOR dan MOE masuk dalam kategori papan partikel [31] dan MOE sesuai dengan papan lunak, dan kemampuan menyerap suara sekitar 50-85% pada frekuensi 522 Hz [16]. Densitas dan ketahanan mekanik linear dengan nilai impedansi akustik kayu, yang menunjukkan sifat dari material. MOE dan densitas sampel D lebih tinggi dari ketiga sampel lainnya. Hasil ini sesuai dengan tren intensitas transmitansi hasil FTIR, dimana peresapan MF terbesar, terjadi pada sampel D yaitu bagian I, II dan V pada Gambar 5, yang merupakan gugus transmitansi MF. Berdasarkan nilai densitas, kadar air dan kestabilan dimensi, sampel kayu modifikasi sudah sesuai jika dimanfaatkan sebagai material akustik.

Tabel 1. Sifat-sifat fisis sampel kayu BKS sebelum dan setelah modifikasi.

Identitas Sampel	Waktu Formalisasi (Hari)	Tekanan Impregnasi (Bar)	Suhu Curing ($^\circ\text{C}$)	KA (%)	ρ (g/cm^3)	S %
BKS Kering	-	-	-	5,72	0,36	4,49
A	3	3	120	2,70	0,68	0,94
B	5	3	120	1,40	0,66	0,54
C	3	5	120	2,80	0,73	0,32
D	5	5	120	2,40	0,76	0,16

Tabel 2. Modulus elastisitas (MOE) dan modulus patah (MOR) sampel kayu BKS.

Identitas Sampel	MOR (MPa)	MOE (MPa)
BKS Kering	2,61	916,23
A	23,24	1681,96
B	27,49	2106,67
C	27,52	2210,35
D	26,95	2460,43

Sifat Akustik

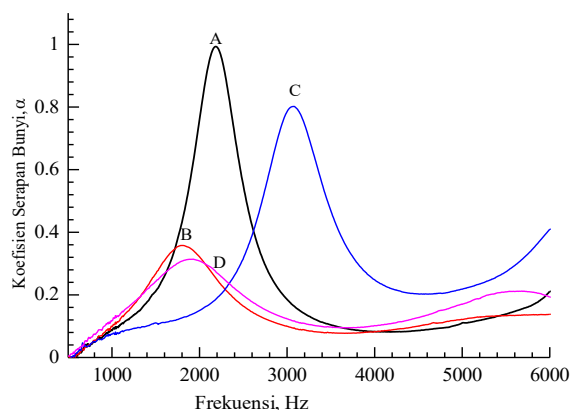
Penyerapan bunyi menunjukkan kemampuan kayu untuk mentransmisikan energi bunyi dan kemampuan kayu untuk meredam atau mereduksi bunyi. Kayu dengan koefisien penyerapan bunyi tinggi memiliki kemampuan baik dalam mereduksi bunyi.

Perlakuan formalisasi menyebabkan pori-pori kayu mengecil, lebih kering dan serat-serat kayu lebih mudah dipisahkan. Hal ini terjadi karena kayu telah kehilangan lignin dan zat lilin selama proses formalisasi. Modifikasi ini mengakibatkan sifat adesif kayu meningkat, karena terlepasnya kandungan air sebagai hasil reaksi dan akhirnya, pengikatan polimer MF dan kayu semakin baik.

Perlakuan impregnasi oleh MF menyebabkan kayu menjadi lebih padat dan keras, serta rongga-rongga kayu menjadi jauh berkurang. Keberadaan zat lilin mempengaruhi sifat viskoelastik kayu, dimana sifat ini mempengaruhi kecepatan bunyi yang merambat dalam media kayu [32,33]. Sifat penyerapan bunyi (α) berkurang jika jumlah pori-pori di dalam kayu berkurang, densitas dan MOE kayu meningkat. Gambar 6 adalah tren koefisien penyerapan bunyi sampel uji, dimana kayu BKS yang dibuat merupakan bahan penyerap suara resonator Helmholtz atau disebut juga sebagai penyerap resonansi, dimana karakteristiknya ditunjukkan oleh puncak penyerapan (α maksimum) dan luasan *bandwidth*. Bentuk peredam resonansi disebabkan oleh struktur kayu masih memiliki rongga atau pori[34].

Peningkatan waktu formalisasi (3 ke 5 hari) dengan tekanan impregnasi yang sama (3 bar atau 5 bar) telah menurunkan puncak resonansi dan *bandwidth* bergeser ke frekuensi yang lebih rendah dengan pita yang lebih lebar.

Puncak resonansi sampel A dan B telah mengubah kelas koefisien penyerapan bunyi dari kelas a ke kelas d dan pergeseran frekuensi kerja dari frekuensi 2180 Hz ke 1800 Hz. Demikian juga



Gambar 6. Koefisien penyerapan bunyi sampel uji.

untuk sampel C dan D, berubah dari kelas b ke kelas d dengan pergeseran frekuensi kerja dari 3060 Hz ke frekuensi 1900 Hz. Pergeseran ke frekuensi lebih rendah menunjukkan sampel lebih rapat dan kaku dan penurunan α menunjukkan pengurangan pori-pori kayu. Demikian juga berdasarkan peningkatan tekanan impregnasi, sampel A dan C, berubah dari kelas a ke kelas b, dan sampel B dan D berada pada kelas d, [35] seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 3.

Kombinasi kimia dua langkah ini, dengan memvariasikan tekanan impregnasi, menyebabkan lebar resonansi lebih sempit dibandingkan penelitian dengan variasi pH formalisasi, demikian juga dengan pergeseran frekuensi kerja lebih rendah yaitu sekitar 2000 Hz untuk sampel A, B dan D, sedangkan dengan variasi pH formalisasi berada sekitar frekuensi 3000 Hz. [8] Dengan demikian, modifikasi limbah kayu BKS telah memperluas kinerja akustiknya.

Tabel 3. Kelas koefisien penyerapan bunyi setelah modifikasi sesuai EN ISO 11654[35]

Identitas Sampel	α	F (Hz)	Kelas	α EN ISO 11654
A	0,99	2180	a	0,90 - 1,00
B	0,36	1800	d	0,30 - 0,60
C	0,80	3060	b	0,75 - 0,85
D	0,31	1900	d	0,30 - 0,60

4. Kesimpulan

Kombinasi modifikasi kimia formalisasi dan impregnasi dalam penelitian ini telah mengubah struktur kimia dan morfologi kayu dari limbah BKS. Kayu menjadi lebih keras, kuat dan padat. Perubahan struktur kimia dikonfirmasi oleh gugus fungsi yang ditunjukkan oleh FTIR, dimana terjadi pergeseran puncak gugus fungsi dan terbentuknya

gugus fungsi baru. Perubahan morfologi kayu dikonfirmasi dengan hasil gambar SEM dimana rongga-rongga kayu sebagian besar telah diisi oleh impregnan MF.

Perlakuan waktu formalisasi dan tekanan impregnasi telah meningkatkan sifat fisis dan mekanik kayu dan juga memperluas kinerja akustik limbah kayu BKS sebagai aplikasi penyerap resonansi. Puncak resonansi yang dihasilkan pada kelas a, b, dan d serta lebar *bandwidth* semakin lebar dan frekuensi kerja bergeser ke frekuensi lebih rendah.

Daftar Pustaka

- [1] Kementerian Perindustrian, Laporan kinerja Kementerian Perindustrian tahun 2015, Kementerian Perindustrian. (2016).
- [2] Directorate General of Plantation, Oil Palm Area by Province in Indonesia, pp.2020, 2019.
- [3] Afifah, S., Tanah 340 Ribu Hektare Ditanami Sawit, Ini Hasilnya, [cited 2022 Jan 4], Available from <https://www.tagar.id/tanah-340-ribu-hektare-ditanami-sawit-ini-hasilnya>.
- [4] Lamaming, J., Hashim, R., Leh, C. P., Sulaiman, O., Sugimoto, T., dan Nasir, M., Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from parenchyma and vascular bundle of oil palm trunk (*Elaeis guineensis*), *Carbohydrate Polymers*, **134**, pp.534–540, 2015.
- [5] Khalil, H. P. S. A., Amouzgar, P., Jawaid, M., Abdullah, C. K., Issam, A. M., Zainudin, E. S., Paridah, M. T., dan Hassan, A., Physical and thermal properties of microwave-dried wood lumber impregnated with phenol formaldehyde resin, *Journal of Composite Materials*, **47**(28), pp.3565–3571, 2013.
- [6] Dungani, R., Jawaid, M., Khalil, H. P. S. A., Jasni, Aprilia, S., Hakeem, K. R., Hartati, S., and Islam, M. N., A review on quality enhancement of oil palm trunk waste by resin impregnation: Future materials, *BioResources*, **8**(2), pp.3136–3156, 2013.
- [7] Salim, N., Hashim, R., Sulaiman, O., Ibrahim, M., Nasir, M., Sato, M., Sugimoto, T., and Hiziroglu, S., Improved performance of compressed oil palm trunk prepared from modified pre-steaming technique, *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, **13**(1), pp.1–7, 2016.
- [8] Manik, T. N., Nuki, S. A., Fauziyah, N. A., and Zainuri, M., Structure, Dynamic-Mechanical and Acoustic Properties of oil palm trunk modified by melamine formaldehyde, *Journal of Renewable Material*, 2021.
- [9] Manik, T. N., Mashuri, and Darminto, Study on formalization of oil palm trunk modified by melamine formaldehyde, *Materials Science Forum*, **966 MSF**, pp.151–156, 2019.
- [10] Kerdtongmee, P., Saleh, A., Eadkhong, T., and Danworaphong, S., Investigating Sound Absorption of Oil Palm Trunk Panels Using One-microphone Impedance Tube, *BioResources*, **11**(4), pp.8409–8418, 2016.
- [11] Kalaivani, R., Ewe, L. S., Chua, Y. L., and Ibrahim, Z., The Effects of Different Thickness of Oil Palm Trunk (OPT) Fiberboard on Acoustic Properties, *American Journal of Environmental Engineering and Science*, **29**(5), pp.1105–1108, 2017.
- [12] Kalaivani, R., Ewe, L. S., Zaroog, O. S., Woon, H. S., and Ibrahim, Z., Acoustic properties of natural fiber of oil palm trunk, *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, **5**(6), pp.88–92, 2018.
- [13] Smardzewski, J., Batko, W., Kamisiński, T., Flach, A., Pilch, A., Dziurka, D., Mirski, R., Roszyk, E., dan Majewski, A., Experimental study of wood acoustic absorption characteristics, *Holzforschung*, **68**(4), pp.467–476, 2014.
- [14] Brémaud, I., Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones: Biological and cultural diversity, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **131**(1), pp.807–818, 2012.
- [15] Goken, J., Fayed, S., Schafer, H., dan Enzenauer, J., A study on the correlation between wood moisture and the damping behaviour of the tonewood spruce, *Acta Physica Polonica A*, **133**(5), pp.1241–1260, 2018.
- [16] Sarasini, F., Mechanical and Thermal Properties of Less Common Natural Fibres and Their Composites, 2018.
- [17] Wegst, U. G. K., Wood for sound, *American Journal of Botany*, **93**(10), pp.1439–1448, 2006.
- [18] Deka, M. and Saikia, C. N., Chemical modification of wood with thermosetting resin: Effect on dimensional stability and strength property, *Bioresource Technology*, **73**(2), pp.179–181, 2000.
- [19] Ormondroyd, G. A., Adhesives for wood composites, Elsevier Ltd., 2015.
- [20] Gindl, W., Hansmann, C., Gierlinger, N., Schwanninger, M., Hinterstoisser, B., and Jeronimidis, G., Using a water-soluble melamine-formaldehyde resin to improve the hardness of Norway spruce wood. *Journal of Applied Polymer Science.*, **93**(4), 1900–1907. (2004).
- [21] Gindl, W., Yaghubi, F.Z., and Wimmer, R., 2003

- Impregnation of softwood cell walls with melamine formaldehyde resin bioresource Technology 87 2003 325 330.pdf.
- [22] Dungani, R., Abdul Khalil, H. P. S., Islam, M. N., Sumardi, I., Aditiawati, P., and Hadiyane, A., Soil burial degradation of Oil Palm Shell (OPS) nanofiller and Phenol Formaldehyde (PF) resin-impregnated Oil Palm Trunk Lumber (OPTL): Dimensional stability and mechanical properties, *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, **10**(4), pp.258–264, 2016.
- [23] Badan Standardisasi Nasional, Papan partikel, Standar Nasional Indonesia (Papan Serat), pp.1–23, 2006.
- [24] Japanese Industrial Standard, Particleboard (JIS A 5908), Japanese Standard Association, 1994.
- [25] Chieng, B. W., Lee, S. H., Ibrahim, N. A., Then, Y. Y., dan Loo, Y. Y., Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from oil palm mesocarp fiber, *Polymers*, **9**(8), pp.1–11, 2017.
- [26] Hill, C. A. S., *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*, Wiley, 2006.
- [27] Horikawa, Y., Hirano, S., Mihashi, A., Kobayashi, Y., Zhai, S., dan Sugiyama, J., Prediction of Lignin Contents from Infrared Spectroscopy: Chemical Digestion and Lignin/Biomass Ratios of *Cryptomeria japonica*, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, **188**(4), pp.1066–1076, 2019.
- [28] Merline, D. J., Vukusic, S., dan Abdala, A. A., Melamine formaldehyde: Curing studies and reaction mechanism, *Polymer Journal*, **45**(4), pp.413–419, 2013.
- [29] Yano, H. dan Kajita, H., Chemical Treatment of Wood for Musical Instruments, *The Journal of the Acoustical Society of America* 96(6), pp.3380–3391, 2014.
- [30] Damanik, R. I. M., *Kekuatan Kayu*, pp.1–7, 2005.
- [31] Jawaid, M., Tahir P.M, *Lignocellulosic Fibre and Biomass-Based Composite Materials, Processing, Properties and Application*, Woodhead Publishing Elsevier, pp. 15, 2017
- [32] Rowell, R. M., Akitsu H., Norimoto, M., Morooka, T., Effect Of Humidity On Vibrational Properties, *Wood Science and Technology*, **25**(3), pp.250–260, 1993.
- [33] Yano, H., Norimoto, M., dan Rowell, R., Stabilization of acoustical properties of wooden musical instruments by acetylation, *Wood and fiber science*, **25**(4), pp.395–403, 1993.
- [34] Cox, T. J.; D’Antonio, P.; dan Schroeder, M., *Acoustic Absorbers and Diffusers, Theory, design and application*, Taylor and Francis, pp.225-255, 2005.
- [35] ISO 11654, *Acoustical Sound Absorbers for Use in Buildings-Rating of Sound Absorption*, 1997.