

Sifat Termal Dan Antibakteri Busa Komposit Poliuretan Kaku Dengan Pengisi Zeolit Alami Dan Daun Cengkeh

Erfina Oktariani^{1*}, Krisna Bayu¹, Nerviani Nadari Rizkika¹, Herlin Arina¹

¹Program Studi Teknik Kimia Polimer, Politeknik STMI Jakarta

**corresponding email*: erfina@kemenperin.go.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan komposit busa poliuretan (PU) yang memiliki sifat antibakteri dan ketahanan termal yang baik, dengan menambahkan serbuk daun cengkeh dan zeolit alam sebagai bahan pengisi. Daun cengkeh dipilih karena kandungan senyawa fenolik, seperti eugenol, yang memiliki aktivitas antibakteri, sedangkan zeolit alam ditambahkan untuk meningkatkan ketahanan termal komposit. Komposit PU dengan variasi konsentrasi daun cengkeh (1%, 1,5%, dan 2% wt) dan zeolit (10%, 20%, 30% wt) diproduksi dan dianalisis menggunakan FTIR, DSC, serta uji antibakteri terhadap *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh penambahan daun cengkeh dan zeolit terhadap sifat antibakteri dan termal komposit PU, serta menentukan komposisi optimal yang memberikan keseimbangan antara performa antibakteri dan ketahanan termal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan daun cengkeh dapat meningkatkan aktivitas antibakteri komposit PU, dengan konsentrasi optimal pada 1% wt. Penambahan zeolit meningkatkan ketahanan termal komposit PU, dengan komposit yang mengandung 20% dan 30% zeolit menunjukkan kestabilan termal yang lebih baik dibandingkan komposit tanpa zeolit. Komposit PU yang diperkaya dengan daun cengkeh dan zeolit memiliki sifat antibakteri yang efektif dan ketahanan termal yang tinggi, menjadikannya sebagai alternatif bahan insulasi ramah lingkungan untuk berbagai aplikasi industri, terutama dalam bidang konstruksi dan pengemasan.

Kata Kunci:

poliuretan, zeolit, komposit, pengisi, daun cengkeh, sifat termal, morfologi

PENDAHULUAN

Industri produk polimer terus mengalami peningkatan baik dalam hal kualitas maupun produk dari bahan komposit polimer baru. Hal ini terlihat dari terus bermunculan produk baru dengan kualitas dan harga yang lebih baik di pasar (Gultom et al., 2016). Bahan polimer jenis poliuretan (PU) adalah salah satu kelompok bahan polimer yang paling penting. Di antara berbagai jenis bahan PU, busa poliuretan setara dengan 67% dari total konsumsi PU. Di antara bahan insulasi yang tersedia secara komersial, seperti wol mineral atau polistirena yang diperluas, busa PU kaku menunjukkan sifat insulasi yang lebih baik. Koefisien konduktivitas termal (λ) busa PU bervariasi antara 0,018 dan 0,025 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (Członka et al., 2020). Karena itu, busa PU kaku biasanya digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti konstruksi atau bangunan, insulasi industri, atau peralatan rumah tangga.

Masalah utama yang terkait dengan industri PU adalah ketergantungan isosianat dan polioliol pada produk petrokimia (Członka et al., 2020). Persyaratan legislatif yang terkait dengan perlindungan lingkungan memimpin industri kimia menuju pengembangan bahan komposit hijau baru (Kosmela et al., 2019). Salah satu solusi yang memenuhi regulasi tersebut adalah pengenalan polioliol yang berasal dari sumber alami, seperti minyak nabati. Beberapa penelitian telah melaporkan bio-polioliol berdasarkan minyak nabati yang berbeda, seperti minyak jarak, minyak kedelai (Kreye et al., 2013), minyak sawit, minyak lobak, minyak tung, minyak bunga matahari atau minyak canola untuk mengembangkan jenis baru busa PU berbasis bio yang ramah lingkungan (Członka et al., 2020).

Kekurangan utama busa PU berdasarkan bio-polioliol adalah kekuatan mekanik yang relatif rendah (Kurańska et al., 2019b). Telah dinyatakan bahwa penambahan berbagai jenis pengisi organik dan anorganik dapat meningkatkan sifat mekanik busa komposit PU. Selain banyak sifat menguntungkan dari komposit PU yang disiapkan, aplikasi pengisi yang diperoleh dari sumber alami telah menarik lebih banyak perhatian (Członka et al., 2020). Hal tersebut menarik banyak peneliti untuk mengembangkan serat selulosa alami sebagai pengisi PU dan juga sekaligus sebagai penguat.

Bahan pengisi alami yang berasal dari tumbuh-tumbuhan saat ini semakin diminati. Serbuk pelepah pisang contohnya, dapat memberikan pengaruh yang sangat besar terhadap kekerasan komposit polimer berpengisi serbuk pelepah pisang (Lelawati, 2023). Di antara berbagai jenis pengisi yang digunakan sebagai pengisi penguat busa PU, hingga saat ini belum ada publikasi yang dilakukan untuk meneliti peningkatan sifat mekanik, termal, dan antibakteri busa komposit PU yang dimodifikasi dengan penambahan *Syzygium aromaticum*, yang dikenal sebagai cengkeh. Saat ini, cengkeh dibudidayakan di berbagai belahan dunia termasuk Indonesia atau Brasil. Cengkih adalah salah satu sumber terkaya dari ekstrak fenolik (Chaieb et al., 2007). Terutama kandungannya yang terdiri dari eugenol (50% -90%), eugenol asetat, timol, dan tanena. Karena itu, cengkeh memiliki sifat luar biasa termasuk aktivitas antioksidan, antimikroba, dan anti jamur. Ekstrak cengkeh banyak digunakan sebagai bahan aditif pada bahan polimer, misalnya bahan kemasan makanan.

Ditemukan satu penelitian yang memanfaatkan serbuk bunga cengkeh sebagai pengisi busa PU dengan variasi berat 1, 2 dan 5 % (Członka et al., 2020). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa penambahan 1 dan 2% berat bahan pengisi cengkeh memberikan kekuatan mekanis yang lebih baik. Selain itu, telah terbukti bahwa bahan pengisi cengkeh dapat digunakan sebagai senyawa antiaging alami untuk bahan polimer. Berdasarkan hasil antibakteri, telah ditunjukkan bahwa penambahan bahan pengisi cengkeh secara signifikan meningkatkan sifat antibakteri busa PU dan cocok untuk pembuatan busa komposit PU antimikroba (Członka et al., 2020). Tetapi dilihat dari hasil uji dekomposisi termal, belum ditemukan kondisi yang terbaik dari tiga variasi berat pengisi cengkeh tersebut.

Selain itu, zeolit alam akhir-akhir ini menarik perhatian karena sifatnya yang khas, yaitu senyawa anorganik berstruktur alumina silikat dengan kerangka tiga dimensi SiO_4 dan AlO_3 dan struktur pori-porinya. Zeolit alam merupakan mineral yang murah. Pemanfaatan zeolit alam sebagai katalis dalam pengolahan limbah plastic menjadi bahan bakar menunjukkan bahwa zeolit alam berkontribusi dalam distribusi rantai karbon (Tahdi et al., 2022). Penggunaan zeolite alam di Indonesia sendiri masih belum dijangkau oleh industri polimer. Zeolit alam banyak

digunakan sebagai penyerap kelembapan ruangan, serta untuk pasir hewan peliharaan. Meskipun demikian, telah ada usaha untuk memanfaatkan zeolite alam sebagai pengisi (filler) dalam usaha meningkatkan karakteristik bahan polimer (Gultom et al., 2016). Penelitian terdahulu yang telah dilakukan adalah komposit busa PU dengan pengisi zeolite menunjukkan hasil kestabilan termal yang baik (Oktariani & Sari, 2021).

Hal tersebut menarik untuk diangkat dengan lebih berfokus pada persen berat yang lebih rendah serta memanfaatkan daun cengkeh yang memiliki kandungan ekanol tidak jauh berbeda dengan bunganya. Selain itu harga daun cengkeh kering lebih murah daripada bunga cengkeh sehingga menjadikan daya pikat tersendiri untuk diangkat dalam penelitian ini. Kombinasi pengisi antara serbuk daun cengkeh dan zeolit sangat menarik dan menjanjikan untuk peningkatan kualitas dari busa PU sebagai bahan insulator panas.

METODOLOGI PENELITIAN

Alat dan Bahan

Peralatan penelitian diperoleh dari Laboratorium Politeknik STMI Jakarta. Alat-alat utama yang digunakan adalah *Mixer* merk Miyako, blender/grinder, dan *Thermogravimetric Analyzer* (TGA), *Differential Scanning Calorimetry* (DSC). Selain alat utama, juga digunakan peralatan penunjang antara lain *oven*, kaca arloji, *tray*, termometer, desikator, timbangan analitik, mortir, dan ayakan 80/100 *mesh*.

Bahan yang digunakan adalah Polioliol yang diproduksi oleh Tosoh Jepang, Isosianat jenis Metil difenildiisosiinat (MDI) yang diproduksi oleh Tosoh Jepang, serbuk daun cengkeh kering dan zeolit alam.

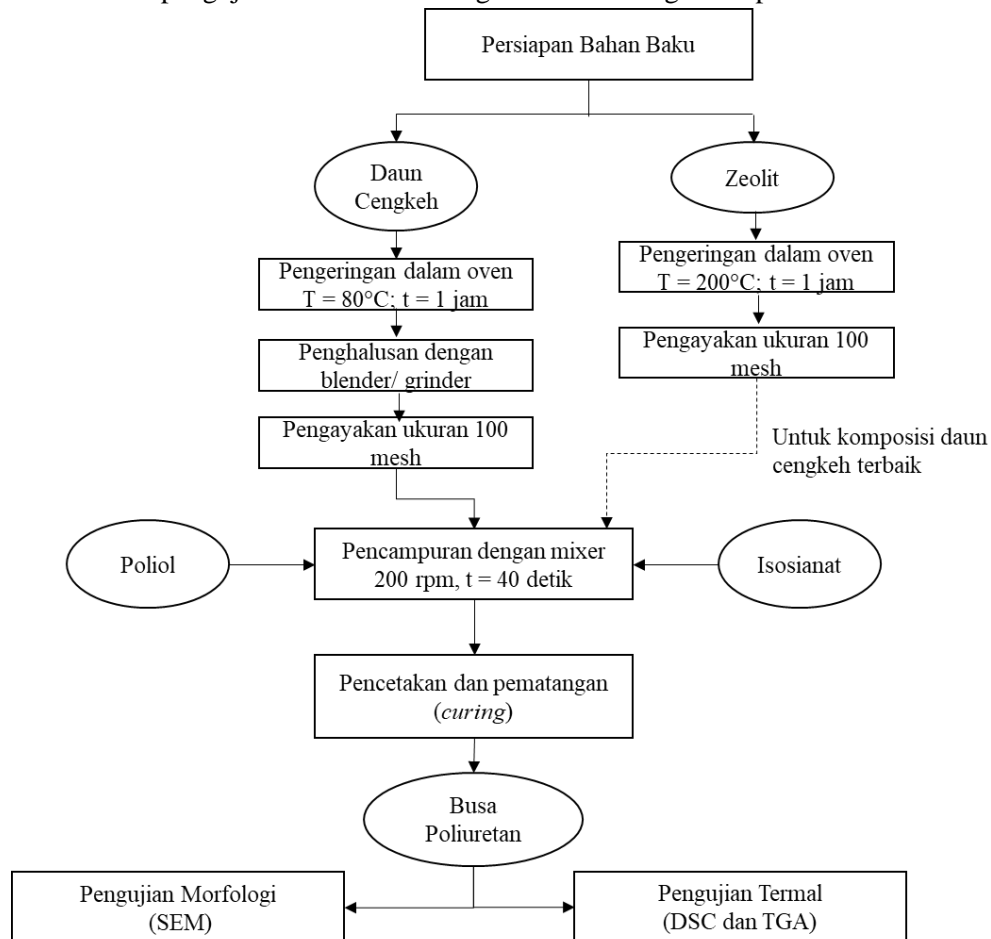
Prosedur

Gambar 1 menunjukkan diagram alir mencakup prosedur penelitian. Serbuk daun cengkeh diayak dengan menggunakan ayakan 100 mesh agar ukuran partikelnya seragam dan penyebarannya merata, kemudian dikeringkan menggunakan oven pada temperatur 90°C selama 3 jam. Selanjutnya untuk serbuk zeolit dilakukan hal yang sama seperti serbuk daun cengkeh, diayak terlebih dahulu menggunakan ayakan 100 mesh, lalu dikeringkan dengan oven pada temperatur 150°C selama 5 jam. Setiap 15 menit sekali dilakukan pengecekan massa zeolit secara konstan.

Pembuatan komposit busa poliuretan/daun cengkeh/zeolit, dimulai dengan menimbang masing-masing bahan. Perbandingan antara polioliol dan isosianat yang digunakan yaitu 1:1 menurut penelitian Mohamed dkk., (2021) dikarenakan dapat menghasilkan busa poliuretan dengan ukuran pori-pori yang lebih kecil. Persentase berat daun cengkeh 1 wt% dan persentase berat zeolit 0 wt%, 15 wt%, 20 wt%, 30 wt%. Serbuk daun cengkeh 1 wt% dan serbuk zeolit 0 wt% dicampur dengan polioliol dan isosianat pada temperatur ruang dengan level kecepatan terendah dan lama pengadukan konstan selama 60 detik dengan menggunakan mixer. Kemudian campuran dituangkan kedalam cetakan terbuka dan dibiarkan berbusa sampai *curing* (menjadi padat) sekitar 24 jam pada temperatur kamar. Hal yang sama juga dilakukan pada zeolit dengan persentase berat 15 wt%, 20 wt% dan 30 wt% untuk memantau pengaruh kandungan zeolit terhadap stabilitas polimer.

Pengujian derajat kristalinitas dan temperatur transisi kaca dilakukan dengan menggunakan alat differential scanning calorimetry (DSC), sampel yang digunakan seberat ± 7 mg dengan rentang

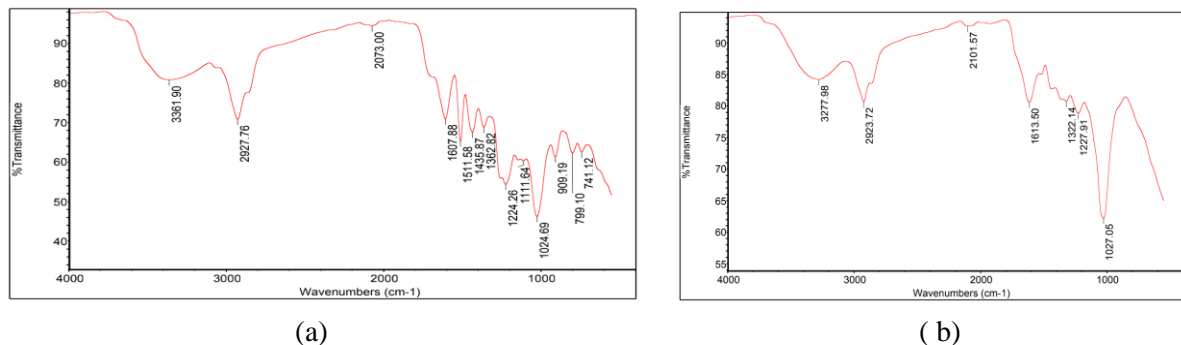
temperatur operasi yang digunakan yaitu 20°C sampai dengan 300°C. Terdapat 4 sampel yang diuji stabilitas termalnya. Pengujian temperatur dekomposisi dilakukan menggunakan alat Thermogravimetric Analysis (TGA), dengan sampel yang digunakan sebesar ± 10 mg dan rentang temperatur operasi yang digunakan yaitu 50°C sampai dengan 600°C dengan laju pemanasan konstan 10 °C/menit dan waktu pengujian setiap sampel selama 120 menit (termasuk penurunan temperatur). Setelah itu dilakukan pengujian SEM untuk mengetahui morfologi busa poliuretan.



Gambar 1. Prosedur pembuatan komposit busa PU/serbuk daun cengkeh/zeolit

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian FTIR bunga dan daun cengkeh dilakukan untuk mengamati keberadaan gugus-gugus fungsi sebagai agen aktif antimikroba.



Gambar 2 Spektrum *Fourier-Transform Infrared* (FTIR): a) Bunga Cengkeh, b) Daun Cengkeh

Gambar 2. memperlihatkan hasil pengujian FTIR dari bunga dan daun cengkeh. Pengujian dilakukan untuk meyakinkan bahwa komposisi daun cengkeh memiliki kemiripan dengan bunga cengkeh. Karakteristik gugus fungsi masing-masing dapat dilihat pada Tabel 1. Berdasarkan hasil analisis Fourier-Transform Infrared (FTIR), spektrum bunga dan daun cengkeh menunjukkan adanya kemiripan dalam gugus fungsional yang terdeteksi. Kedua sampel mengandung gugus hidroksil (-OH) yang terletak pada daerah sekitar 3361,90 cm^{-1} untuk bunga cengkeh dan 3277,98 cm^{-1} untuk daun cengkeh, yang menunjukkan keberadaan senyawa fenolik seperti eugenol. Perbedaan kecil dalam pergeseran bilangan gelombang ini dapat disebabkan oleh variasi dalam struktur molekul atau tingkat interaksi hidrogen antar molekul dalam sampel.

Tabel 1 Karakteristik gugus fungsi bunga dan daun cengkeh

No	Bunga Cengkeh	Daun Cengkeh	Gugus Fungsi
1	3361,90	3277,98	-OH
2	2927,76	2923,72	-CH ₂
3	1607,88	1613,50	C=O
4	1435,87	1435,87	C=C aromatic stretching
5	1607,88	1613,50	C=C vinyl stretching mode
6	1511,58	1511,85	C=C aromatic stretching
7	1362,82	1322,14	C-OH fenol deformation vibration
8	1111,64	1227,91	C-OH fenol stretching vibration
9	1024,69	1027,05	C-OH fenol

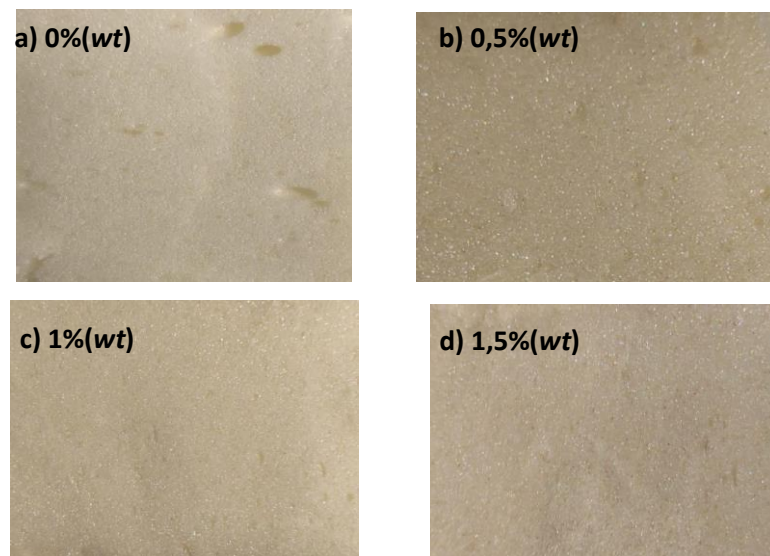
Selanjutnya, pita serapan pada daerah sekitar 2927,76 cm^{-1} (bunga cengkeh) dan 2923,72 cm^{-1} (daun cengkeh) menunjukkan keberadaan gugus -CH₂, yang umumnya berasal dari rantai alifatik dalam senyawa organik. Gugus karbonil (C=O) juga terdeteksi pada 1607,88 cm^{-1} untuk bunga cengkeh dan 1613,50 cm^{-1} untuk daun cengkeh, yang mungkin terkait dengan adanya senyawa karbonil dalam struktur eugenol asetat. Gugus fungsi lainnya yang menunjukkan kesamaan antara bunga dan daun cengkeh adalah gugus C=C aromatic stretching yang berada pada sekitar 1435,87 cm^{-1} . Selain itu, C=C vinyl stretching mode terdeteksi pada daerah sekitar 1607,88 cm^{-1} untuk bunga cengkeh dan 1613,50 cm^{-1} untuk daun cengkeh. Hal ini menunjukkan keberadaan senyawa aromatik dan struktur vinil yang menjadi karakteristik utama dari eugenol dan turunannya. Lebih lanjut, pita serapan pada daerah 1511,58 cm^{-1} untuk bunga cengkeh dan 1511,85 cm^{-1} untuk daun cengkeh juga menunjukkan karakteristik stretching C=C dalam cincin aromatik. Selain itu, keberadaan gugus fenol juga dikonfirmasi melalui vibrasi deformasi C-OH fenol pada daerah 1362,82 cm^{-1} (bunga cengkeh) dan 1322,14 cm^{-1} (daun cengkeh). Vibrasi stretching C-OH fenol juga terdeteksi pada sekitar 1111,64 cm^{-1} dan 1227,91 cm^{-1} , serta vibrasi tambahan C-OH fenol di sekitar 1024,69 cm^{-1} (bunga cengkeh) dan 1027,05 cm^{-1} (daun cengkeh).

Dari hasil FTIR serbuk bunga cengkeh dan serbuk daun cengkeh ini hasil ini menunjukkan bahwa gugus fungsi yang terdapat dalam bunga dan daun cengkeh memiliki kemiripan yang signifikan, terutama dalam kandungan senyawa fenolik seperti eugenol. Kesamaan ini mengindikasikan bahwa daun cengkeh berpotensi sebagai alternatif pengisi dalam busa poliuretan dengan sifat antimikroba, mirip dengan yang telah dikembangkan menggunakan bunga cengkeh. Hasil pengujian ini menguatkan hipotesa awal bahwa daun cengkeh dapat digunakan sebagai aditif antimikroba dalam busa Poliuretan.

Produk Komposit Busa Poliuretan/Daun Cengkeh dan Busa Poliuretan/Daun Cengkeh/Zeolit

Produk busa poliuretan yang dihasilkan adalah jenis busa rigid, dengan tekstur yang keras dan kokoh. Semakin banyak aditif serbuk daun cengkeh yang ditambahkan maka warna busa PU menjadi semakin gelap. Gambar 3 memperlihatkan bahwa struktur busa poliuretan mengalami perubahan seiring

dengan peningkatan konsentrasi daun cengkeh. Sampel tanpa penambahan daun cengkeh (0%) memiliki struktur yang relatif halus dengan pori-pori kecil yang sedikit terlihat. Pada konsentrasi 0,5% (b), tampak bahwa busa mulai menunjukkan distribusi pori yang lebih jelas, meskipun masih cukup homogen. Pada 1% (c), permukaan busa tampak lebih kasar dibandingkan dengan 0% dan 0,5%, menunjukkan kemungkinan adanya aglomerasi partikel daun cengkeh dalam matriks poliuretan. Pada 1,5% (d), tekstur busa tampak semakin kasar dan lebih padat, yang dapat mengindikasikan peningkatan densitas akibat pengaruh filler dari daun cengkeh.



Gambar 3. Busa Poliuretan dengan kandungan a) 0% wt, b) 0,5% wt, c) 1% wt dan d) 1,5% wt serbuk daun cengkeh.

Dengan meningkatnya konsentrasi daun cengkeh, tampaknya ada perubahan pada distribusi pori busa. Pada kadar 1% dan 1,5%, kemungkinan terjadi aglomerasi yang dapat menyebabkan distribusi pori menjadi lebih tidak merata dibandingkan dengan 0% dan 0,5%. Secara kasat mata dari gambar 3 dapat diprediksi bahwa penambahan daun cengkeh dalam jumlah kecil (hingga 0,5%) masih mempertahankan struktur busa yang baik, sedangkan pada konsentrasi lebih tinggi (1% dan 1,5%), kemungkinan terjadi peningkatan densitas yang dapat mempengaruhi sifat mekanik seperti kekerasan dan elastisitas.

Aktivitas Antimikroba Komposit Busa Poliuretan/Daun Cengkeh

Tabel 2 menunjukkan aktivitas antimikroba busa poliuretan (PU) dengan campuran daun cengkeh terhadap *Escherichia coli* (ATCC 10536). Busa poliuretan dengan konsentrasi 0,5% wt daun cengkeh menunjukkan efektivitas antimikroba cukup baik, tetapi belum maksimal. Peningkatan aktivitas antimikroba terjadi pada konsentrasi 1% wt yang terlihat dari nilai G yang lebih tinggi dibandingkan konsentrasi lainnya. Tetapi, efektivitas tampaknya menurun kembali setelah konsentrasi daun cengkeh dinaikkan menjadi 1,5% wt. Hal ini kemungkinan akibat kejenuhan bahan aktif dari daun cengkeh dalam matriks busa PU, yang dapat menghambat difusi senyawa antimikroba.

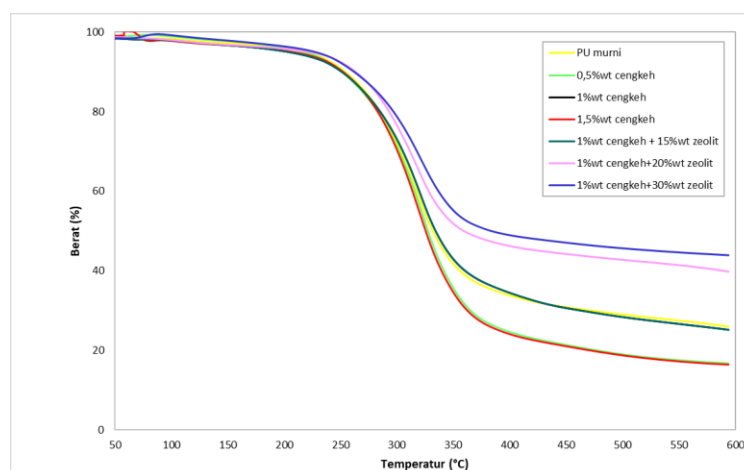
Tabel 2. Aktivitas Antimikroba Busa PU/Daun Cengkeh

Kandungan Cengkeh (% wt)	Microorganism Strains	Inoculum Concentration (CFU/ml)	F	G	A
0,5	<i>Escherichia coli</i> (ATCC 10536)	$1,5 \times 10^6$	3,27	1,15	2,12
1	<i>Escherichia coli</i> (ATCC 10536)	$1,5 \times 10^6$	3,27	1,62	1,65
1,5	<i>Escherichia coli</i> (ATCC 10536)	$1,5 \times 10^6$	3,27	1,15	2,12

Penurunan aktivitas pada 1,5% wt daun cengkeh menunjukkan bahwa peningkatan kandungan daun cengkeh tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan aktivitas antimikroba, yang mungkin disebabkan oleh interaksi material yang membatasi pelepasan senyawa aktif. Jika dilihat dari penelitian sebelumnya uji mikrobiologi dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh bahan pengisi cengkeh terhadap sifat antibakteri busa komposit PU. Eliminasi dari bakteri (*Escherichia coli* dan *Stafilokokus aureus*) diamati setelah 24 jam. Hasil antibakteri terbaik diperoleh untuk sampel yang mengandung 5% berat bahan pengisi cengkeh. Penghambatan bakteri (*Escherichia coli* dan *Stafilokokus aureus*) dengan aplikasi pengisi cengkeh 5% berat masing-masing sekitar 76% dan 79% (Czlonka dkk., 2020). Data yang didapat berbeda karena menggunakan metode uji yang berbeda.

Ketahanan Termal Komposit Busa Poliuretan/Daun Cengkeh dan Busa Poliuretan/Daun Cengkeh/Zeolit

Gambar 4. menunjukkan hasil pengujian Thermogravimetric Analyses (TGA) terhadap busa poliuretan dengan dan tanpa serbuk daun cengkeh. Kurva menunjukkan penurunan berat sebagai fungsi dari suhu, yang mencerminkan proses degradasi termal material. Busa poliuretan murni (kuning) mengalami degradasi signifikan pada suhu sekitar 300–400°C, menunjukkan bahwa struktur polimernya mulai terurai pada rentang suhu tersebut. Sampel dengan penambahan daun cengkeh (0,5%, 1%, dan 1,5%) memiliki pola degradasi yang mirip dengan busa poliuretan murni, menunjukkan bahwa penambahan cengkeh tidak secara signifikan meningkatkan ketahanan termal. Namun, sampel dengan kombinasi cengkeh dan zeolit menunjukkan perbedaan signifikan, terutama pada kandungan zeolit yang lebih tinggi.



Gambar 4. Ketahanan termal komposit busa poliuretan dilihat dari penurunan berat selama pemanasan. Penambahan 15% zeolit dengan 1% daun cengkeh tidak menunjukkan peningkatan ketahanan termal yang mencolok dibandingkan PU murni. Namun, pada 20% dan 30% zeolit, degradasi termal tertunda, dengan penurunan berat yang lebih lambat. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi daun cengkeh dan zeolit tidak hanya memberikan sifat fungsional tambahan (misalnya antimikroba dari

cengkeh), tetapi juga meningkatkan stabilitas termal busa poliuretan. Zeolit memiliki sifat tahan panas yang baik dan dapat berfungsi sebagai stabilisator termal, sehingga memperlambat dekomposisi polimer.

Karakterisasi termal Busa Poliuretan/Daun Cengkeh dan Busa Poliuretan/Daun Cengkeh/Zeolit dengan DSC

Berdasarkan data hasil pengujian dengan Differential Scanning Calorimetry (DSC) sebagaimana pada Tabel 3, busa poliuretan murni memiliki T_g sebesar $106,6^{\circ}\text{C}$. Penambahan 0,5% dan 1% daun cengkeh meningkatkan T_g hingga mencapai 113°C , menunjukkan bahwa interaksi antara daun cengkeh dan matriks busa poliuretan meningkatkan kekakuan rantai polimer. Namun, pada konsentrasi 1,5% daun cengkeh, T_g menurun menjadi 101°C , yang kemungkinan disebabkan oleh distribusi yang tidak merata atau efek plastisasi dari senyawa aktif dalam daun cengkeh. Penambahan zeolit dengan 15% meningkatkan T_g hingga $115,4^{\circ}\text{C}$, menunjukkan peningkatan ketahanan termal. Namun, pada 20% zeolit, T_g turun signifikan menjadi $98,4^{\circ}\text{C}$, menandakan bahwa kelebihan zeolit mengganggu jaringan polimer dan meningkatkan fleksibilitas.

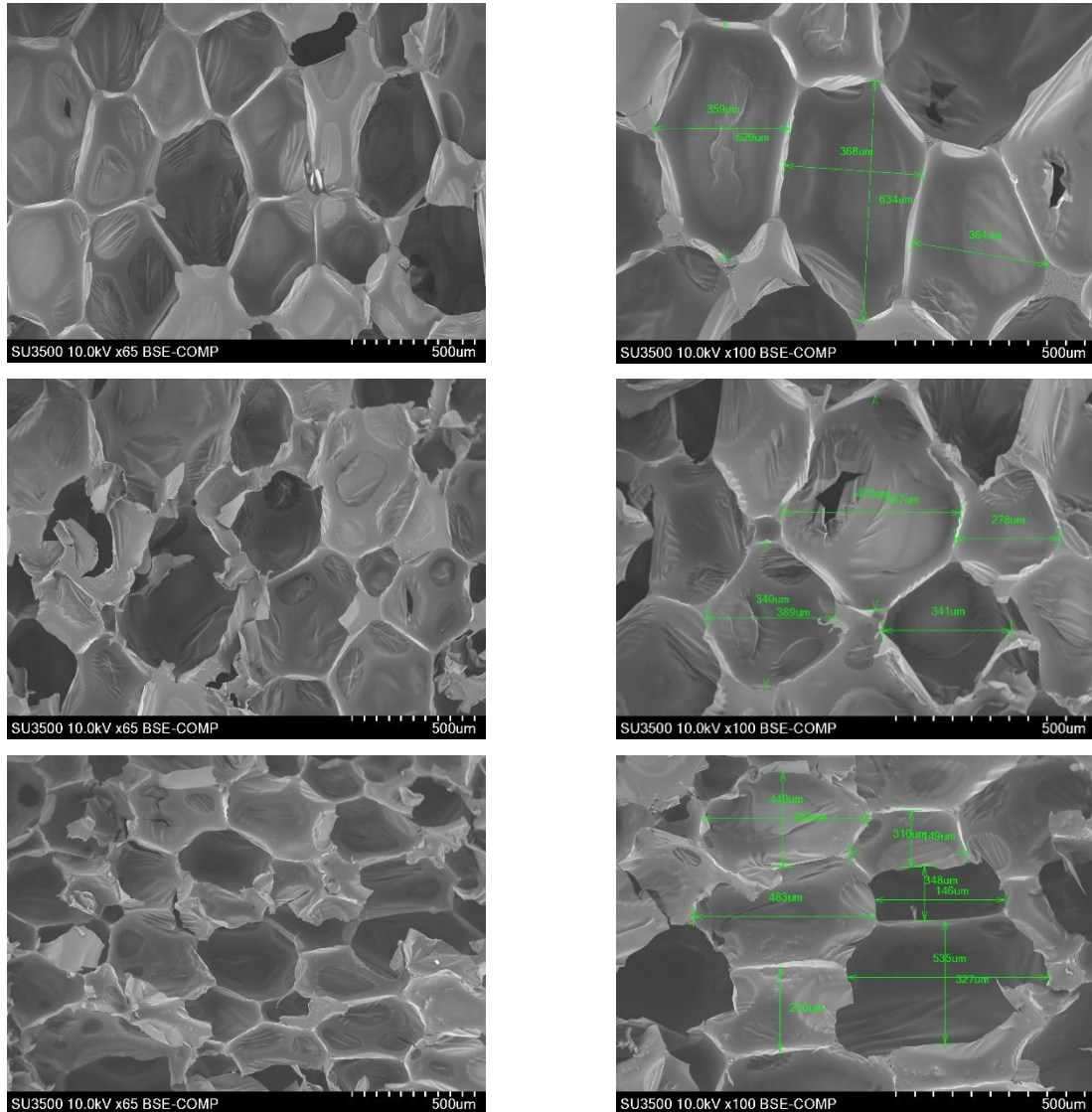
Busa poliuretan murni memiliki nilai ΔH_m yang rendah ($4,22 \text{ J/g}$), menunjukkan bahwa material ini sebagian besar amorf. Dengan penambahan daun cengkeh, ΔH_m meningkat secara signifikan, mencapai $30,67 \text{ J/g}$ pada 1% daun cengkeh. Ini menunjukkan bahwa daun cengkeh berkontribusi pada peningkatan pembentukan daerah semi-kristalin dalam matriks PU. Namun, pada 1,5% daun cengkeh, nilai ΔH_m menurun menjadi $21,33 \text{ J/g}$, yang menunjukkan bahwa konsentrasi yang terlalu tinggi dapat mengganggu keteraturan struktur polimer. Ketika zeolit ditambahkan, nilai ΔH_m menurun drastis, terutama pada 20% zeolit ($3,477 \text{ J/g}$). Hal ini menunjukkan bahwa zeolit menghambat pembentukan kristal dalam matriks poliuretan. Penambahan 0,5% dan 1% daun cengkeh meningkatkan kristalinitas secara signifikan hingga mencapai 15,58%, menunjukkan bahwa daun cengkeh berperan dalam menginduksi pembentukan daerah semi-kristalin dalam busa poliuretan. Pada 1,5% daun cengkeh, kristalinitas sedikit menurun menjadi 10,84%, yang konsisten dengan data ΔH_m . Ketika zeolit ditambahkan, kristalinitas mengalami penurunan drastis, terutama pada 20% zeolit yang hanya memiliki kristalinitas 1,77%. Ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi tinggi, zeolit dapat mengganggu keteraturan rantai polimer dan lebih mendorong fase amorf. Kombinasi 1% daun cengkeh dan 15% zeolit menunjukkan sifat termal yang paling stabil dibandingkan variasi lainnya.

Tabel 3 Hasil Pengujian Termal Menggunakan DSC Komposit Busa PU/Daun Cengkeh dan Busa PU/Daun Cengkeh/Zeolit.

Jenis busa	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
Busa PU murni	106,6	4,22	2,14
Busa PU/daun cengkeh 0,5%	107,7	17,74	9,01
Busa PU/daun cengkeh 1%	113	30,67	15,58
Busa PU/daun cengkeh 1,5%	101	21,33	10,84
Busa PU/daun cengkeh 1%/zeolit 15%	115,4	10,32	5,24
Busa PU/daun cengkeh 1%/zeolit 20%	98,4	3,477	1,77
Busa PU/daun cengkeh 1%/zeolit 30%	101,6	18,63	9,47

Morfologi Busa Poliuretan Murni, Komposit Busa Poliuretan/Daun Cengkeh dan Busa Poliuretan/Daun Cengkeh/Zeolit

Struktur sel pada busa poliuretan yang terbentuk berdasarkan hasil uji morfologi dari tiga macam busa PU sebagaimana terlihat di Gambar 5, menunjukkan kesesuaian dengan bentuk heksagonal pada sel busa PU keras (*rigid polyurethane*) (Peyrton & Avérous, 2021). Ukuran pori/gelembung memperlihatkan bahwa ukuran pori akan semakin kecil dengan ditambahkan filler/pengisi (zeolite) dan aditif (daun cengkeh). Hal ini memberikan konfirmasi bahwa struktur morfologi busa mempengaruhi densitas. Karena semakin kecil ukuran pori, akan semakin besar densitas busa. Semakin rendah densitas busa, maka kekuatan tekannya akan semakin rendah pula (Yang et al., 2012).



Gambar 5 Struktur morfologi sel busa (a) PU murni, (b) PU/daun cengkeh dan (c) PU/daun cengkeh/zeolit

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan serbuk daun cengkeh dalam komposit busa poliuretan dapat meningkatkan sifat mekanik, antibakteri, dan termal dari material tersebut. Berdasarkan pengujian FTIR, daun cengkeh mengandung senyawa fenolik seperti eugenol, yang memberikan potensi sebagai agen antimikroba. Secara keseluruhan, penambahan daun cengkeh dan zeolit alam dapat meningkatkan kualitas busa PU sebagai bahan insulasi termal dan antimikroba, serta memberikan alternatif ramah lingkungan dengan biaya produksi yang lebih rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- Apostolopoulou-Kalkavoura, V., Munier, P., & Bergström, L. (2021). Thermally Insulating Nanocellulose-Based Materials. *Advanced Materials*, 33(28). <https://doi.org/10.1002/adma.202001839>
- Ashida, K. (2006). *Polyurethane and related foams: chemistry and technology*. CRC press.
- Barczewski, M., Kurańska, M., Sałasińska, K., Michałowski, S., Prociak, A., Uram, K., & Lewandowski, K. (2020). Rigid polyurethane foams modified with thermoset polyester-glass fiber composite waste. *Polymer Testing*, 81, 106190. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106190>
- Cornille, A., Guillet, C., Benyahya, S., Negrell, C., Boutevin, B., & Caillol, S. (2016). Room temperature flexible isocyanate-free polyurethane foams. *European Polymer Journal*, 84, 873–888.
- Dworakowska, S., Bogdał, D., Zaccheria, F., & Ravasio, N. (2014). The role of catalysis in the synthesis of polyurethane foams based on renewable raw materials. *Catalysis Today*, 223, 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2013.11.054>
- Gultom, F., Wirjosentono, B., Thamrin, Nainggolan, H., & Eddiyanto. (2016). Preparation and Characterization of North Sumatera Natural Zeolite Polyurethane Nanocomposite Foams for Light-weight Engineering Materials. *Procedia Chemistry*, 19, 1007–1013. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.150>
- Gultom, G., Wirjosentono, B., Ginting, M., & Sebayang, K. (2017). Effects of natural zeolite and ferric oxide to electromagnetic and reflection loss properties of polyurethane nanocomposite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 223(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/223/1/012031>
- Ionescu, M. (2005). *Chemistry and technology of polyols for polyurethanes*. iSmithers Rapra Publishing.
- Kosmela, P., Gosz, K., Kazimierski, P., Hejna, A., Haponiuk, J. T., & Piszczyk, Ł. (2019). Chemical structures, rheological and physical properties of biopolyols prepared via solvothermal liquefaction of *Enteromorpha* and *Zostera marina* biomass. *Cellulose*, 26(10), 5893–5912. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02540-8>
- Kurańska, M., Barczewski, M., Uram, K., Lewandowski, K., Prociak, A., & Michałowski, S. (2019). Basalt waste management in the production of highly effective porous polyurethane composites for thermal insulating applications. *Polymer Testing*, 76, 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.02.008>
- Laurichesse, S., & Avérous, L. (2014). Chemical modification of lignins: Towards biobased polymers. *Progress in Polymer Science*, 39(7), 1266–1290.
- Lelawati, Tonadi, E., & Aan Sefentry. (2023). Analisis Kekerasan Papan Komposit dari Serat Pelepah Pisang Dengan Resin Polyester. *Jurnal Redoks*, 8(2), 152–157. <https://doi.org/10.31851/redoks.v8i2.13614>

- Li, Y. (2012). *Application of cellulose nanowhisker and lignin in preparation of rigid polyurethane nanocomposite foams*. Georgia Institute of Technology.
- Olad, A., & Naseri, B. (2010). Preparation, characterization and anticorrosive properties of a novel polyaniline/clinoptilolite nanocomposite. *Progress in Organic Coatings*, 67(3), 233–238.
- Pathirana, H., Wimalasena, S., De Silva, B. C. J., Hossain, S., & Heo, G. (2019). Antibacterial activity of clove essential oil and eugenol against fish pathogenic bacteria isolated from cultured olive flounder (*Paralichthys olivaceus*). *Slov. Vet. Res*, 56, 31–38.
- Peyrton, J., & Avérous, L. (2021). Structure-properties relationships of cellular materials from biobased polyurethane foams. In *Materials Science and Engineering R: Reports* (Vol. 145). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100608>
- PlasticsEurope, E. (2016). *Plastics—The Facts 2019. An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data*. *Plast. Eur.*
- Querol, X., Moreno, N., Umaña, J. C. t, Alastuey, A., Hernández, E., Lopez-Soler, A., & Plana, F. (2002). Synthesis of zeolites from coal fly ash: an overview. *International Journal of Coal Geology*, 50(1–4), 413–423.
- Rodrigues Pereira de Paula, C., Trianoski, R., & Azevedo, E. (2020). Development and characterization of sawdust and sisal fiber reinforced vegetable based polyurethane foam hybrid composites. *Journal of Natural Fibers*, 00(00), 1–10. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1841067>
- Safari, H., Karevan, M., & Nahvi, H. (2018). Mechanical characterization of natural nano-structured zeolite/polyurethane filled 3D woven glass fiber composite sandwich panels. In *Polymer Testing* (Vol. 67). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.03.018>
- Scarfato, P., Di Maio, L., & Incarnato, L. (2017). Structure and physical-mechanical properties related to comfort of flexible polyurethane foams for mattress and effects of artificial weathering. *Composites Part B: Engineering*, 109, 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.041>
- Tahdid, T., Manggala, A., Wasiran, Y., Nurryma, I., Ramadhani, P. S., & Kobar, A. A. (2022). Pengaruh Jumlah Zeolit dan Temperatur terhadap Rendemen Bahan Bakar Cair Menggunakan Limbah Plastik di Unit Thermal Catalytic Cracking Reactor. *Jurnal Redoks*, 7(2), 26–32. <https://doi.org/10.31851/redoks.v7i2.9269>
- Tran, P., Graiver, D., & Narayan, R. (2005). Ozone-mediated polyol synthesis from soybean oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 82(9), 653–659.
- Triwulandari, E. N. A. ; H. (2014). Jurnal Sains Materi Indonesia SAWIT SEBAGAI BAHAN BAKU BUSA POLIURETAN. *Jurnal Sains Indonesia*, 16(1), 43–48.
- Wang, S. X., Zhao, H. B., Rao, W. H., Huang, S. C., Wang, T., Liao, W., & Wang, Y. Z. (2018). Inherently flame-retardant rigid polyurethane foams with excellent thermal insulation and mechanical properties. *Polymer*, 153, 616–625. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.08.068>
- Yang, L. T., Zhao, C. S., Dai, C. L., Fu, L. Y., & Lin, S. Q. (2012). Thermal and Mechanical Properties of Polyurethane Rigid Foam Based on Epoxidized Soybean Oil. *Journal of Polymers and the Environment*, 20(1), 230–236. <https://doi.org/10.1007/s10924-011-0381-6>