

Fabrikasi dan Karakterisasi Biokomposit Selulosa Bakteri-Kitosan dengan Ekstrak Daun Sirih (*Piper betle*) sebagai *Dural Patch*

Deli Suci Rahma Sari
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Purwokerto, Indonesia
delirahma@telkomuniversity.ac.id

Adanti Wido Paramadini, S.T., M.Eng.
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Purwokerto, Indonesia
adanti@telkomuniversity.ac.id

Ajeng Dyah Kurniawati, S.TP., M.Sc.
Fakultas Rekaya Industri
Universitas Telkom
Purwokerto, Indonesia
ajengk@telkomuniversity.ac.id

Dura mater merupakan lapisan pelindung otak dan sumsum tulang belakang. Kerusakan pada dura mater akibat cedera, operasi neurokirurgi, atau infeksi dapat menyebabkan kebocoran cairan serebrospinal dan komplikasi lainnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan biomaterial berbasis *bacterial cellulose* (BC) yang diperkuat dengan kitosan dan ekstrak daun sirih sebagai kandidat *dural patch*. BC disintesis menggunakan *Acetobacter xylinum* dalam media air kelapa, kemudian direndam dalam larutan kitosan dan ekstrak daun sirih dengan variasi konsentrasi (0%, 5%, 10%, 15%) dan dikeringkan menggunakan metode *freeze dry*. Karakterisasi material dilakukan melalui uji FTIR, *swelling*, degradasi, dan antibakteri. Hasil menunjukkan keberhasilan sintesis komposit dengan interaksi gugus fungsi antara BC, kitosan, dan ekstrak daun sirih. Rasio *swelling* tertinggi pada sampel kontrol (1002%) menurun drastis pada konsentrasi 15% (446%). Uji degradasi menunjukkan penambahan ekstrak daun sirih meningkatkan laju degradasi material dengan hasil ANOVA ($p = 0,0429$) yang signifikan. Uji antibakteri menunjukkan peningkatan zona hambat terhadap bakteri *S. aureus* (0–5,4 mm) dan *E. coli* (0–2,2 mm) seiring penambahan konsentrasi ekstrak daun sirih. Hasil ini mengindikasikan bahwa kombinasi BC-kitosan dengan ekstrak daun sirih memiliki potensi sebagai *dural patch* dengan sifat antibakteri, kemampuan penyerapan cairan, dan laju degradasi yang sesuai untuk aplikasi biomedis

Kata kunci: Daun sirih, *dural patch*, kitosan, selulosa bakteri

I. PENDAHULUAN

Cedera otak traumatik adalah gangguan neurologis paling umum, sering menyebabkan kerusakan dura mater dan meningkatkan risiko infeksi serta komplikasi serius [1]. Dura mater berfungsi melindungi sistem saraf pusat, tetapi bisa rusak akibat trauma, inflamasi, atau kelainan bawaan. Pembedahan tengkorak dapat menyebabkan kebocoran cairan serebrospinal (CSF), dengan insiden hingga 10% dan tingkat kematian 15-30% [2]. Di Indonesia, kasus cedera kepala setiap tahunnya diperkirakan mencapai 500.000 kasus [3].

Dura mater terdiri dari sel-sel saraf yang tidak dapat beregenerasi, sehingga diperlukan pengganti dengan struktur

dan sifat fisik ideal. Dura mater buatan harus mereproduksi karakteristik biomekanik asli untuk mencegah respons inflamasi, dapat diserap untuk membentuk jaringan baru tanpa menyatu dengan jaringan sekitar, serta tahan robekan, kedap air, bebas prion dan virus, serta mudah diterapkan [4]. Material ideal harus bersifat *non-neurotoxic*, *non-immunogenic*, *non-inflammatory*, *non-viral/prion*, *non-adhesive*, *watertight*, *viscoelastic*, dan *biomechanically resistant* [4]. Biokomposit selulosa bakteri-kitosan dengan ekstrak daun sirih menawarkan solusi biokompatibel yang tidak memicu penolakan tubuh.

Bacterial cellulose (BC) adalah biopolimer yang memiliki sifat *biodegradable* dan kekuatan mekanis tinggi dan telah dikembangkan dalam berbagai aplikasi rekayasa jaringan seperti dura mater buatan. Polimer ini dapat disintesis melalui fermentasi air kelapa menggunakan bakteri *Acetobacter xylinum* [3]. Di Indonesia adalah negara yang produksi air kelapanya cukup berlimpah. Namun pemanfaatannya masih belum maksimal [5]. Dengan demikian, penelitian ini dapat memanfaatkan potensi air kelapa sebagai substrat fermentasi untuk menghasilkan selulosa bakteri yang berkualitas tinggi. Selain itu, kitosan, yang merupakan biopolimer alami dengan sifat antimikroba, dapat diperoleh dari kitin yang ditemukan dalam cangkang udang dan kepiting, yang juga berlimpah di Indonesia. Kombinasi antara selulosa bakteri dan kitosan diharapkan dapat menciptakan material biokomposit yang ideal untuk digunakan sebagai pengganti dura mater buatan.

BC memiliki sifat fisik dan mekanis yang unggul, seperti kekuatan tarik yang tinggi dan fleksibilitas yang baik, serta memiliki reaksi inflamasi yang rendah. Oleh karena itu, BC kerap digunakan di berbagai aplikasi dalam bidang biomedis, seperti sebagai biomaterial untuk pembuluh darah buatan, graft vaskular, kulit buatan, *scaffolds* untuk rekayasa jaringan, dan perban luka [6]. Sementara kitosan memberikan sifat tambahan seperti biodegradabilitas dan aktivitas antimikroba [7]. Ekstrak daun sirih, yang dikenal memiliki sifat anti-inflamasi dan antimikroba, dapat ditambahkan untuk lebih meningkatkan sifat-sifat material biokomposit ini. Kombinasi ini diharapkan mampu menghasilkan material

yang tidak hanya biokompatibel tetapi juga efektif dalam mencegah infeksi dan penyembuhan jaringan.

II. KAJIAN TEORI

A. Dura Mater

Dura mater adalah salah satu dari tiga lapisan pelindung pelapis otak dan sumsum tulang belakang yang terletak pada lapisan paling luar [8]. Dura mater adalah selaput yang kuat dan tidak elastis yang terletak tepat di bagian dalam tengkorak dan tulang belakang. Selaput ini berfungsi sebagai lapisan yang memberikan perlindungan maksimal terhadap organ-organ saraf.

B. Dural Patch

Dural patch digunakan untuk memperbaiki kerusakan pada dura mater yang disebabkan oleh trauma kranioserebral, tumor otak, penyakit serebrovaskular, dan kerusakan dura mater lainnya yang diakibatkan oleh berbagai prosedur bedah saraf dan kecelakaan [9]. *Dural patch* memiliki sifat fisik yang lebih baik dan ketebalan yang lebih tipis, serta dapat langsung menutupi permukaan dura mater untuk mencegah kebocoran cairan serebrospinal [10]. *Dural patch* dapat secara signifikan meningkatkan proliferasi fibroblas, yang mendorong pembentukan jaringan ikat fibrosa pelindung, serta memiliki kemampuan anti-inflamasi dan analgesik pada periode pasca operasi awal perbaikan dura spinal.

C. Selulosa Bakteri

Selulosa Bakteri (BC) adalah polimer alami yang umumnya dihasilkan oleh bakteri gram negatif seperti dikenal *Acetobacter xylinum* pada media yang kaya akan sumber karbon seperti glukosa [11]. BC memiliki struktur serat nano yang sangat tipis [12], memberikan kekuatan mekanik tinggi, kemampuan menahan air besar, dan tingkat kristalinitas tinggi. BC juga memiliki derajat polimerisasi tinggi dan kompatibilitas biologis yang baik [13]. BC telah digunakan dalam berbagai aplikasi medis, seperti pembuluh darah buatan, graft vaskular, scaffold untuk rekayasa jaringan, dan balutan luka [14]. Selain itu, BC juga menunjukkan kompatibilitas untuk duraplasi dan dapat digunakan sebagai substrat untuk garis sel saraf atau sel induk mesenkim [19].

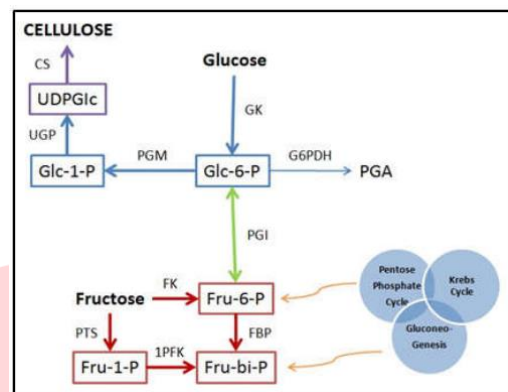
D. Biokomposit Selulosa Bakteri

Komposit merupakan bahan yang tersusun dari dua atau lebih komponen berbeda secara fisik atau kimia yang digabungkan bersama. Biokomposit selulosa bakteri merupakan bahan yang terdiri dari matriks selulosa bakteri yang disusun bersama dengan material lain, seperti polimer atau senyawa lainnya, yang dalam penelitian ini adalah kitosan dan ekstrak daun sirih untuk meningkatkan atau memodifikasi sifat-sifatnya.

E. *Acetobacter xylinum*

Bakteri ini merupakan mikroorganisme yang tidak patogen, dengan ukuran panjang 2 ~ 10 µm dan lebar 0,5 ~ 1,0 µm. *A. xylinum* dapat ditemukan dalam bentuk tunggal, berpasangan, atau dengan tonjolan bulat [15]. *Acetobacter xylinum* diklasifikasikan sebagai bakteri asam asetat, yang berarti dapat mengubah gula menjadi asam asetat dan selulosa selama fermentasi [16]. Selulosa bakteri yang

dihasilkan oleh *Acetobacter xylinum* memiliki keunggulan berupa kemurnian tinggi, karena bebas dari lignin dan hemiselulosa, serta kekuatan mekanis yang luar biasa, seperti kekuatan tarik yang tinggi dan fleksibilitas yang baik. Proses produksinya dilakukan dengan memanfaatkan substrat kaya karbon, seperti glukosa, sukrosa, atau air kelapa.



GAMBAR 1. PROSES FERMENTASI *A.XYLINUM* [17]

F. Kitosan

Kitosan (*poly-d-glucosamine*) adalah polimer alami yang didapatkan dari proses deasetilasi kitin dengan rumus kimia $(C_6H_{11}NO_4)_n$ [18]. Kitin sering ditemukan pada cangkang invertebrata, dinding sel jamur/ragi, dan endoskeleton kulit moluska, atau eksoskeleton artropoda. Kitosan mempunyai biodegradabilitas tinggi, biokompatibilitas yang baik, serta toksisitas yang rendah.

G. Daun Sirih

Daun sirih (*Piper betle Linn*) adalah tanaman yang banyak ditemukan daerah Asia tropis hingga Afrika Timur [19]. Daun sirih dikenal memiliki berbagai sifat terapeutik, yaitu sebagai antiseptik, antiinflamasi, dan antimikroba [20]. Sifat-sifat ini berasal dari senyawa kimia aktif yang terdapat di dalam daun sirih seperti senyawa minyak atsiri, polifenol, flavonoid, dan tanin. Tanaman ini mampu membunuh kuman dan menghambat bakteri patogen [21].

H. Freeze-drying

Freeze-drying liofilisasi, adalah proses pengeringan yang melibatkan pembekuan produk terlebih dahulu, kemudian mengurangi tekanan di sekitar produk untuk memungkinkan air dalam bentuk es menyublim langsung menjadi uap tanpa melewati fase cair [22][23]. Proses ini sering digunakan dalam industri farmasi untuk mengeringkan produk-produk seperti protein dan obat-obatan dengan berat molekul rendah [23]. Proses *freeze-drying* melibatkan beberapa tahap utama, yaitu tahap pembekuan, tahap pengeringan primer, dan tahap pengeringan sekunder [22]. Pembekuan dilakukan untuk mengubah air dalam produk menjadi es. Pengeringan primer dilakukan di bawah tekanan rendah untuk menyublimkan es menjadi uap air, sementara pengeringan sekunder bertujuan untuk menghilangkan sisa air yang terikat pada produk [23].

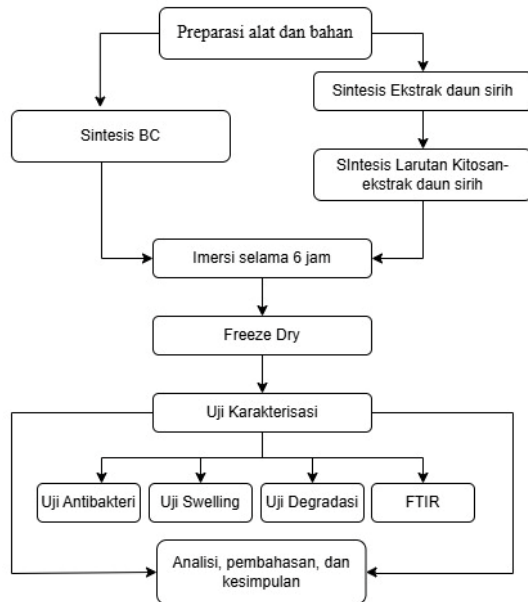
I. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

FTIR adalah teknik analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan ikatan kimia dalam suatu material berdasarkan spektrum inframerah yang dihasilkan.

Dalam FTIR, sampel diekspos pada sinar inframerah, yang kemudian diserap oleh molekul-molekul dalam sampel, menyebabkan getaran dan rotasi pada ikatan kimianya. Setiap jenis ikatan kimia memiliki frekuensi serapan yang unik, menghasilkan spektrum inframerah yang spesifik untuk material tersebut [24].

III. METODE

Tahapan dalam proses pengujian biomaterial berbasis selulosa bakteri (BC) yang dimodifikasi menggunakan tambahan kitosan dan ekstrak daun sirih digambarkan dalam skema berikut.

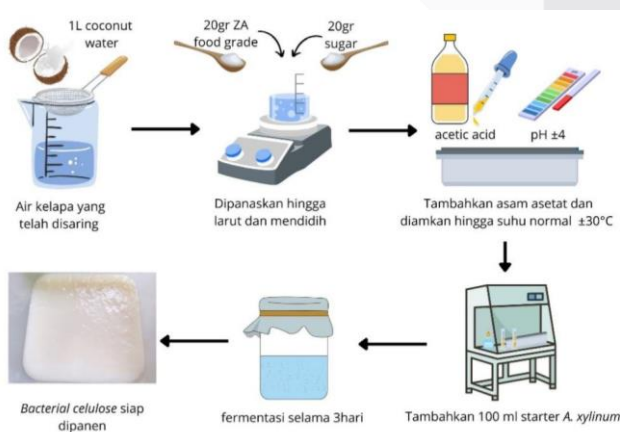


GAMBAR 3. SKEMA PEMBUATAN EKSTRAK DAUN SIRIH

A. Alat dan Bahan

Peralatan untuk menunjang penelitian ini terdiri dari alat sintesis dan alat uji. Alat sintesis mencakup neraca digital, gelas beaker, *magnetic stirrer*, kompor, pH meter, mikropipet, termometer, wadah fermentasi, gelas ukur, spatula, dan *freeze-dryer*. Alat uji menggunakan Agilent Cary 630 FTIR, cawan petri, *Autoclave*, dan inkubator. Bahan yang digunakan meliputi starter bakteri *Acetobacter xylinum*, ekstrak daun sirih, kitosan, NaOH, asam asetat, amonium sulfat (ZA), gula, air kelapa, media NA, dan aquades.

B. Sintesis Selulosa Bakteri



GAMBAR 2. SKEMA PEMBUATAN SELULOSA BAKTERI

Selulosa bakteri dihasilkan melalui proses fermentasi menggunakan starter bakteri *Acetobacter xylinum* dalam media berbasis air kelapa. Proses sintesis diawali dengan pembuatan media fermentasi, di mana air kelapa yang telah disaring sebanyak 1 L dicampur dengan 20 gram ZA dan 20 gram gula. Campuran ini kemudian dipanaskan hingga mencapai suhu 98°C. Setelah itu, media fermentasi dituangkan ke dalam wadah atau bak fermentasi dan dibiarkan berfermentasi selama tiga hari hingga terbentuk lapisan selulosa bakteri setebal 0,5 cm. Setelah proses fermentasi selesai, selulosa yang dihasilkan dicuci berulang kali menggunakan aquades.

C. Sintesis Ekstrak Daun Sirih



GAMBAR 4. SKEMA PEMBUATAN EKSTRAK DAUN SIRIH

Proses ekstraksi dilakukan menggunakan metode maserasi, di mana serbuk daun sirih direndam dalam etanol 90% dengan konsentrasi 10% w/v. Proses maserasi berlangsung selama 7 hari, kemudian larutan difilter menggunakan kertas saring *Whatman*. Filtrat yang didapat lalu diuapkan menggunakan *water bath* pada suhu 80°C hingga terbentuk ekstrak kental berwarna kecoklatan.

D. Sintesis Larutan Kitosan

Persiapan dimulai dengan mencampurkan 2 ml asam asetat (CH_3COOH) ke dalam 0,1 L aquades dan diaduk selama 20 menit [2], [20]. Selanjutnya, larutan kitosan dibuat dengan melarutkan 1 gram kitosan dalam 0,1 L larutan CH_3COOH 2%, menghasilkan konsentrasi kitosan sebesar 0,1% w/v. Proses pelarutan dilakukan menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 600 rpm pada suhu 50°C selama 90 menit hingga homogen. Setelah itu, ekstrak daun sirih ditambahkan dengan variasi konsentrasi 0%, 5%, 10%, dan 15%, kemudian dilakukan pengadukan kembali menggunakan *stirrer* selama 1 jam.

E. Fabrikasi Membran Biokomposit Selulosa Bakteri

Membran selulosa bakteri (5×5 cm) direndam selama 6 jam, kemudian dikeringkan dengan *freeze dry* selama 2×8 jam. Dengan keempat variasi ekstrak daun sirih tersebut, penelitian ini menggunakan empat sampel sebagai berikut:

1. **Kontrol**, sebagai variabel kontrol, merupakan BC yang direndam dengan larutan 1% kitosan dan tanpa penambahan ekstrak daun sirih

2. **BC-5%**, merupakan BC yang direndam dengan larutan 1% kitosan dan 5% ekstrak daun sirih
3. **BC-10%**, merupakan BC yang direndam dengan larutan 1% kitosan dan 10% ekstrak daun sirih
4. **BC-15%** merupakan BC yang direndam dengan larutan 1% kitosan dan 15% ekstrak daun sirih.

F. Uji *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

Pengujian ini bertujuan untuk menganalisis gugus fungsi serta menentukan apakah terjadi ikatan kimia atau fisika dengan mengukur penyerapan radiasi inframerah pada berbagai panjang gelombang. Karakterisasi sampel dilakukan menggunakan spektroskopi inframerah, di mana cahaya laser dipantulkan melalui prisma. Sampel dipotong kecil dengan ukuran 0,1–1 mm, kemudian dibor untuk mempermudah persiapan dalam bentuk membran. Selama proses pengeboran, butiran yang dihasilkan ditempatkan pada KBr. Spektrum inframerah sampel dianalisis pada rentang bilangan gelombang 4000 hingga 200 cm^{-1} .

G. Uji *Swelling*

Sampel kering ditimbang untuk mendapatkan berat awal, lalu direndam dalam *Phosphate Buffered Saline* (PBS) selama 3 menit pada suhu ruang. Tingkat pembengkakan dihitung dengan membandingkan berat awal dan berat setelah perendaman. Uji ini menilai kapasitas absorpsi biokomposit. Persentase absorpsi dihitung dengan rumus:

$$\% \text{ Absorbtion} = \frac{\text{Post hydrating mass} - \text{Pre hydrating mass}}{\text{Pre hydrating mas}} \times 100\%$$

H. Uji Degradasi

Uji degradasi dilakukan untuk mengamati kemampuan membran mengalami degradasi akibat interaksi dengan lingkungan melalui perendaman sampel dalam PBS pada suhu ruang selama 3, 6, dan 9 hari. Setelah perendaman, sampel dikeringkan untuk menghilangkan cairan yang terserap sebelum ditimbang guna mengetahui berat akhirnya. Persentase degradasi dihitung menggunakan rumus:

$$\% \text{ Degradation} = \frac{\text{Post hydrating mass} - \text{Pre hydrating mass}}{\text{Pre hydrating mas}} \times 100\%$$

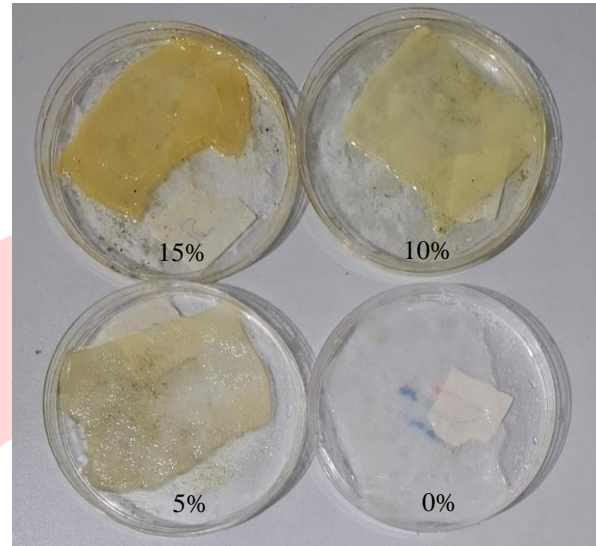
I. Uji Antibakteri

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan biokomposit dalam menghambat pertumbuhan bakteri *Escherichia coli* sebagai golongan bakteri gram negatif serta *Staphylococcus aureus* sebagai golongan gram positif menggunakan metode difusi cakram. Larutan bakteri dicampurkan ke dalam agar cair, kemudian dituangkan ke dalam cawan petri steril. Setelah mengeras, potongan sampel dengan diameter 1 cm diletakkan di permukaannya. Sampel kemudian diinkubasi pada suhu 37°C selama 24 jam, dan setelah itu, zona hambat di sekitar membran diukur.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perendaman BC dengan empat variasi larutan menghasilkan BC seperti pada gambar Gambar 4.1. Sampel kontrol, yang direndam dengan larutan kitosan tanpa diberi ekstrak sirih memiliki warna putih bersih, sedangkan sampel

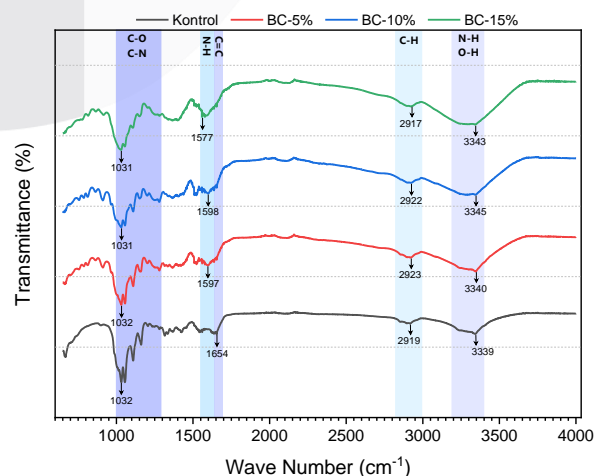
yang direndam dengan larutan kitosan yang diberi ekstrak sirih bewarna cokelat kehijauan. Semakin banyak konsentrasi ekstrak daun sirih yang ditambahkan, maka sampel yang dihasilkan akan bewarna semakin pekat. Hal ini membuktikan bahwa selulosa bakteri telah berhasil menyerap ekstrak daun sirih pada saat proses perendaman.



GAMBAR 4. HASIL PERENDAMAN BC PADA KEEMPAT VARIASI LARUTAN

A. Hasil Uji FTIR

Berdasarkan hasil spektrum FTIR pada gambar, terlihat bahwa semua sampel menunjukkan pola serapan yang serupa, dengan beberapa puncak utama yang mengindikasikan keberadaan gugus fungsi tertentu. Puncak yang muncul di sekitar 3340 cm^{-1} dikaitkan dengan vibrasi stretching N-H dan O-H, yang menunjukkan keberadaan gugus amina dan hidroksil. Intensitas dan posisi puncak ini relatif tidak berubah pada semua sampel, menunjukkan bahwa penambahan ekstrak daun sirih tidak menyebabkan modifikasi struktur kimia yang signifikan. Puncak lain yang muncul di sekitar 2919–2923 cm^{-1} mengindikasikan adanya vibrasi stretching C-H dari gugus alkanes, yang berasal dari struktur selulosa bakteri dan kitosan.



GAMBAR 5. PERBANDINGAN SPEKTRA IR TIAP SAMPEL

Daerah puncak pada 1654–1577 cm^{-1} menunjukkan kombinasi dari gugus karbonil (C=O) dan vibrasi bending gugus amina (N-H). Pergeseran puncak dari 1654 cm^{-1} pada kontrol ke 1577 cm^{-1} pada sampel dengan 15% ekstrak sirih mengindikasikan bahwa semakin besar konsentrasi ekstrak sirih, semakin besar pula interaksi kimia yang terjadi antara gugus amina pada kitosan dengan senyawa aktif dalam ekstrak sirih, seperti tanin dan flavonoid. Puncak pada 1032–1030 cm^{-1} , yang ditemukan pada setiap sampel, berkaitan dengan vibrasi C-OH *stretching* dari alkohol sekunder dan primer selulosa bakteri.

TABEL 1. IDENTIFIKASI GUGUS FUNGSI PADA TIAP SAMPEL

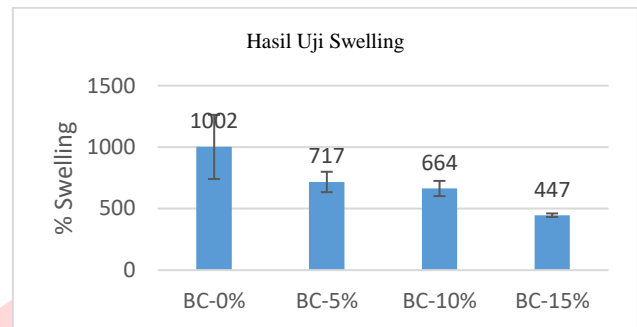
Sampel	Puncak	Gugus Fungsi
BC -0% (Kontrol)	3343.42204 2917.57369 1654.93800 1032.47258	N-H (<i>stretch</i>); O-H <i>bending</i> C-H Alkanes (<i>stretch</i>) C=O <i>amide</i> C-O (<i>stretch</i>) C-N <i>amine</i>
BC -5%	3345.28571 2922.23286 1597.16426 1032.47258	N-H (<i>stretch</i>); O-H <i>bending</i> C-H Alkanes (<i>stretch</i>) N-H <i>bending</i> ; C=C <i>stretch</i> C-O (<i>stretch</i>) C-N <i>amine</i>
BC -10%	3340.62654 2923.16470 1598.09610 1031.54075	N-H (<i>stretch</i>); O-H <i>bending</i> C-H Alkanes (<i>stretch</i>) N-H <i>bending</i> ; C=C <i>stretch</i> C-O (<i>stretch</i>) C-N <i>amine</i>
BC -15%	3339.69470 2919.43736 1577.59574 1030.60891	N-H (<i>stretch</i>); O-H <i>bending</i> C-H Alkanes (<i>stretch</i>) N-H <i>bending</i> ; C=C <i>stretching</i> C-O (<i>stretch</i>) C-N <i>amine</i>

Keseluruhan sampel, baik sampel yang diberikan ekstrak daun sirih maupun tidak, menunjukkan keberadaan gugus hidroksil (-OH), amina (-NH), dan karboksil (C-H). Dengan demikian, dapat ditafsirkan bahwa penambahan ekstrak daun sirih tidak menyebabkan terjadinya perubahan gugus fungsi dan pembentukan komponen baru. Secara keseluruhan, hasil FTIR ini menandakan bahwa pemberian ekstrak daun sirih pada biokomposit menghasilkan interaksi kimia antara senyawa aktif ekstrak dengan komponen biokomposit. Hal ini membuktikan keberhasilan proses modifikasi, dimana senyawa aktif ekstrak daun sirih berinteraksi dengan matriks biokomposit

B. Hasil Uji Swelling

Penelitian ini menunjukkan bahwa rasio *swelling* material menurun dengan meningkatnya konsentrasi ekstrak

daun sirih. Sampel kontrol tanpa ekstrak memiliki rasio *swelling* tertinggi (1002%), sedangkan sampel dengan 15% ekstrak daun sirih memiliki rasio *swelling* terendah (447%). Hal ini mengindikasikan bahwa ekstrak daun sirih berpengaruh signifikan dalam mengurangi kapasitas pembengkakan material.



GAMBAR 5. HASIL UJI SWELLING

Material selulosa bakteri yang baik umumnya memiliki kadar air sebesar lebih dari 85%, dan menurut penelitian L. Jiawei et al. (2023), material untuk aplikasi medis tidak boleh memiliki rasio *swelling* melebihi 781,64%. Berdasarkan standar ini, semua sampel memenuhi kriteria kecuali sampel kontrol, yang dianggap kurang optimal karena kapasitas pembengkakannya terlalu tinggi.

Penurunan rasio *swelling* pada material dengan ekstrak daun sirih dapat disebabkan oleh sifat hidrofobik senyawa aktif seperti flavonoid dan tanin, yang mengurangi kemampuan material menyerap air [25]. Dengan demikian, penambahan ekstrak daun sirih membantu mengontrol rasio *swelling* agar lebih sesuai untuk aplikasi medis yang memerlukan keseimbangan antara kapasitas pembengkakan dan stabilitas mekanis.

C. Hasil Uji Degradasi

Uji degradasi menjelaskan apakah konsentrasi ekstrak daun sirih (*Piper betle*) mempunyai pengaruh terhadap kemampuan degradasi selulosa bakteri (BC) yang diperkuat dengan kitosan. Parameter yang diukur meliputi massa awal material, massa akhir setelah 3, 6, dan 9 hari, serta persentase degradasi pada masing-masing waktu pengamatan.

TABEL 2. HASIL UJI DEGRADASI

Sampel	Massa Awal	Massa Akhir (mg)			% Degradasi		
		3 hari	6 hari	9 hari	3 hari	6 hari	9 hari
BC - 0% (Kontrol)	7 mg	5,6	5,4	5,3	1,4	8,6	10
BC - 5%	13 mg	9,8	7,3	6,9	24,6	43,8	49,9
BC- 10%	27 mg	19,5	14,5	13,2	27,8	46,3	51,1
BC- 15%	18 mg	14,3	7,4	6,2	20,6	58,8	65,6

Berdasarkan hasil penelitian, keseluruhan sampel mengalami proses degradasi material secara perlahan dan bertahap, bukan melalui proses degradasi yang langsung menghilang. Analisis ANOVA dilakukan untuk menganalisis pengaruh konsentrasi ekstrak sirih terhadap kemampuan degradasi material pada tiga waktu pengamatan, yaitu hari ke-3, hari ke-6, dan hari ke-9. Berdasarkan hasil analisis menunjukkan nilai $p = 0,0429$, yang lebih kecil dari tingkat signifikansi standar ($\alpha = 0,05$). Tingkat signifikansi 5% ($\alpha =$

0,05) umumnya digunakan dalam ANOVA guna menentukan apakah perbedaan yang diamati antara rata-rata kelompok signifikan secara statistik. Ambang batas ini menyiratkan tingkat kepercayaan 95% yang sudah cukup dalam penelitian *science*. Nilai $p = 0,0429$ pada penelitian ini menunjukkan bahwa ditemukan perbedaan yang signifikan dalam kemampuan degradasi antara kelompok kontrol dan kelompok dengan penambahan ekstrak sirih.

Hasil uji menunjukkan bahwa kelompok kontrol tanpa penambahan ekstrak sirih memiliki tingkat degradasi yang sangat rendah, yaitu 10% pada hari ke-9. Sebaliknya, kelompok dengan penambahan ekstrak sirih menunjukkan peningkatan degradasi seiring dengan meningkatnya konsentrasi ekstrak. Sampel dengan 5% ekstrak sirih mengalami degradasi hingga 49,9%, sementara sampel dengan 10% ekstrak sirih mencapai 51,1%. Konsentrasi tertinggi (15% ekstrak sirih) menghasilkan degradasi paling signifikan, yaitu sebesar 65,6% pada hari ke-9. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa penambahan ekstrak sirih, terutama pada konsentrasi tinggi, dapat secara signifikan meningkatkan kemampuan degradasi material, dengan efek yang semakin terlihat seiring berjalannya waktu.

D. Hasil Uji Antibakteri

Pengujian antibakteri bertujuan untuk menilai efektivitas suatu bahan dalam menghambat pertumbuhan bakteri patogen. Pengaruh variasi konsentrasi ekstrak daun sirih (*Piper betle*) terhadap ukuran zona hambat (*inhibit zone*) yang terbentuk pada bakteri *Staphylococcus aureus* dan *Escherichia coli* disajikan dalam tabel berikut.

TABEL 3. HASIL UJI ANTIBAKTERI

Konsentrasi	<i>inhibit zone</i> pada bakteri <i>S. aureus</i>	<i>inhibit zone</i> pada bakteri <i>E.coli</i>
0%	0 mm	0 mm
5%	2,15 mm	0 mm
10%	4,4 mm	1,5 mm
15%	5,4 mm	2,2 mm

Berdasarkan hasil uji antibakteri yang tercantum dalam Tabel 3, konsentrasi ekstrak *Piper betle* terbukti memiliki pengaruh signifikan terhadap kemampuan material dalam menekan pertumbuhan bakteri *Staphylococcus aureus* (Gram-positif) dan *Escherichia coli* (Gram-negatif). Pada konsentrasi 0% (kontrol), tidak ditemukan *inhibit zone* pada kedua jenis bakteri, yang mengindikasikan bahwa material tanpa tambahan ekstrak *Piper betle* tidak menunjukkan aktivitas antibakteri. Dengan demikian, aktivitas antibakteri yang terdeteksi pada sampel lain sepenuhnya disebabkan oleh keberadaan ekstrak *Piper betle* dalam material.

Pada konsentrasi 5%, zona hambat yang tercipta pada *S. aureus* memiliki diameter 2,15 mm. Sementara itu, pada *E. coli*, zona hambat belum terbentuk. Hal ini memperlihatkan bahwa pada konsentrasi rendah, ekstrak *Piper betle* lebih efektif dalam mencegah pertumbuhan bakteri Gram-positif dibandingkan dengan bakteri Gram-negatif. Efektivitas yang lebih tinggi terhadap bakteri Gram-positif disebabkan oleh struktur dinding selnya yang lebih sederhana, yaitu hanya terdiri dari beberapa lapisan peptidoglikan, sehingga lebih rentan terhadap senyawa antibakteri dalam ekstrak daun sirih hijau [19], [22].

Sebaliknya, dinding sel bakteri Gram-negatif memiliki struktur yang lebih kompleks karena mengandung membran luar tambahan yang dapat menghambat penetrasi senyawa antibakteri. Bakteri Gram-negatif memiliki tiga polimer pelapis di luar lapisan peptidoglikan, yaitu lipoprotein, selaput luar, dan lipopolisakarida, sehingga membuatnya lebih resisten terhadap agen antibakteri [19].

Pada konsentrasi 10%, zona hambat pada *S. aureus* meningkat secara signifikan menjadi 4,4 mm, sedangkan pada *E. coli* mulai terbentuk zona hambat dengan diameter 1,5 mm. Peningkatan konsentrasi ekstrak *Piper betle* menyebabkan bertambahnya jumlah senyawa aktif yang tersedia untuk menghambat pertumbuhan bakteri, sehingga aktivitas antibakterinya meningkat baik terhadap bakteri Gram-negatif maupun Gram-positif. Namun, efektivitasnya masih lebih besar pada bakteri *S. aureus* dibandingkan *E. coli*.

Pada konsentrasi tertinggi (BC-15%), zona hambat yang muncul pada *S. aureus* mencapai 5,4 mm, sementara pada *E. coli* sebesar 2,2 mm. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak konsentrasi ekstrak yang digunakan, semakin besar kemampuan material dalam mencegah pertumbuhan bakteri. Zona hambat yang lebih luas pada *S. aureus* dibandingkan *E. coli* tetap konsisten dengan struktur dinding sel yang berbeda pada bakteri Gram-positif dan Gram-negatif. Selain itu, senyawa aktif dalam ekstrak *Piper betle*, seperti fenol dan flavonoid, diketahui memiliki sifat antibakteri yang bekerja dengan mengganggu, membran sel, dinding sel sintesis protein, serta sintesis asam nukleat bakteri [19].

Secara keseluruhan, hasil ini membuktikan bahwa ekstrak *Piper betle* memiliki potensi sebagai agen antibakteri yang efektif, terlebih pada bakteri Gram-positif seperti *S. aureus*. Efektivitas antibakterinya bertambah seiring dengan meningkatnya konsentrasi ekstrak yang digunakan. Namun, aktivitasnya terhadap bakteri Gram-negatif seperti *E. coli* lebih rendah karena keberadaan membran luar yang membatasi penetrasi senyawa aktif.

V. KESIMPULAN

Hasil FTIR menunjukkan bahwa penambahan ekstrak daun sirih tidak mengubah gugus fungsi atau membentuk komponen baru, tetapi menghasilkan interaksi kimia antara senyawa aktif ekstrak dengan matriks biokomposit. Hasil uji *swelling* menunjukkan bahwa rasio pembengkakan menurun seiring peningkatan konsentrasi ekstrak daun sirih. Semua sampel memenuhi standar persentase *swelling* kecuali sampel kontrol. Uji degradasi menunjukkan bahwa material mengalami proses degradasi yang bertahap, yang sesuai untuk karakteristik *dural patch*, dengan peningkatan laju degradasi seiring bertambahnya konsentrasi ekstrak daun sirih. Uji Antibakteri menunjukkan bahwa sampel yang diberi ekstrak daun sirih mempunyai sifat anti bakteri terhadap *E. coli* dan *S. aureus*, dengan *inhibit zone* terbesar pada sampel BC-15%. Menurut penelitian ini, sampel BC-15% adalah sampel dengan karakteristik terbaik sebagai *dural patch*.

REFERENSI

- [1] A. I. R. Maas *et al.*, "Traumatic brain injury: progress

- and challenges in prevention, clinical care, and research,” *Lancet Neurol.*, vol. 21, no. 11, pp. 1004–1060, 2022, doi: 10.1016/S1474-4422(22)00309-X.
- [2] P. Widiyanti, H. Jabbar, and D. I. Rudyardjo, “Effects of Variation of Chitosan Concentration on The Characteristics of Membrane Cellulose Bacteria-Chitosan Biocomposites as Candidates for Artificial Dura Mater,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1817, 2017, doi: 10.1063/1.4976763.
- [3] I. Ichwanuddin and A. Nashirah, “Cedera Kepala Sedang,” *AVERROUS J. Kedokt. dan Kesehat. Malikussaleh*, vol. 8, no. 2, p. 1, 2022, doi: 10.29103/averrous.v8i2.8726.
- [4] A. Balasa, P. Kunert, T. Dziedzic, M. Bielecki, S. Kujawski, and A. Marchel, “Comparison of dural grafts and methods of graft fixation in Chiari malformation type I decompression surgery,” *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–8, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-94179-4.
- [5] H. Yolanda and Y. Mulyana, “Uji Coba Penggunaan Limbah Air Kelapa Tua sebagai Bahan Dasar Media Isolasi,” *Maj. Kedokt. Bandung*, vol. 43, no. 3, pp. 117–121, 2011, doi: 10.15395/mkb.v43n3.56.
- [6] C. Xu, *et al.*, “Bacterial cellulose membranes used as artificial substitutes for dural deflection in rabbits,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 15, no. 6, pp. 10855–10867, 2014, doi: 10.3390/ijms150610855.
- [7] A. K. Magani, T. E. Tallei, and B. J. Kolondam, “Uji Antibakteri Nanopartikel Kitosan terhadap Pertumbuhan Bakteri *Staphylococcus aureus* dan *Escherichia coli.*,” *J. Bios Logos*, vol. 10, no. 1, p. 7, 2020, doi: 10.35799/jbl.10.1.2020.27978.
- [8] R. Tamura, *et al.*, “A Multilayered Dural Repair Technique Using Duragen for Early Cranioplasty Following Decompressive Craniotomy,” *Surgeries (Switzerland)*, vol. 2, no. 4, pp. 371–377, 2021, doi: 10.3390/surgeries2040036.
- [9] M. R. M. Technologies, “Neo Dura.pdf,” 2023 [Online]. Available: www.medprin.com
- [10] J. Li, J. Tian, C. Li, L. Chen, and Y. Zhao, “A hydrogel spinal dural patch with potential antiinflammatory, pain relieving and antibacterial effects,” *Bioact. Mater.*, vol. 14, no. January, pp. 389–401, 2022, doi: 10.1016/j.bioactmat.2022.01.043.
- [11] D. Fitriarni, I. S. Prawiro, N. Verawati, W. Hardiansyah, and D. Aprianti, “Biosintesis dan Karakterisasi *Bacterial Cellulose* menggunakan Media Sari Pedada (*Sonneratia caseolaris*) dan Kundur (*Benincasa hispida*),” *J. Selulosa*, vol. 9, no. 01, p. 1, 2019, doi: 10.25269/jssel.v9i01.250.
- [12] C. A. Bobby, S. Muhsinin, and A. Roni, “Review: Produksi, Karakterisasi Dan Aplikasi Selulosa Bakteri Di Bidang Farmasi,” *JOPS (Journal Pharm. Sci.)*, vol. 4, no. 2, pp. 12–28, 2021, doi: 10.36341/jops.v4i2.1887.
- [13] E. Goldschmidt *et al.*, “Construction and in vitro testing of a cellulose dura mater graft,” *Neurol. Res.*, vol. 38, no. 1, pp. 25–31, 2016, doi: 10.1080/01616412.2015.1122263.
- [14] P. Widiyanti, H. Jabbar, and D. I. Rudyardjo, “Effects of variation of chitosan concentration on the characteristics of membrane cellulose bacteria-chitosan biocomposites as candidates for artificial dura mater,” in *AIP Conference Proceedings*, 2017, pp. 1–8. doi: 10.1063/1.4976763.
- [15] D. mei Liu *et al.*, “The effect of ultraviolet modification of *Acetobacter xylinum* (CGMCC No. 7431) and the use of coconut milk on the yield and quality of bacterial cellulose,” *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 54, no. 11, pp. 3099–3108, 2019, doi: 10.1111/ijfs.14225.
- [16] N. A. Yanti, *et al.*, “Characterization of BC Produced by *Acetobacter xylinum* strain Lkn6 Using Sago Liquid Waste as Nutrient Source,” *Pakistan J. Biol. Sci.*, vol. 24, no. 3, pp. 335–344, 2021, doi: 10.3923/pjbs.2021.335.344.
- [17] N. Srivastava, S. Jha, and S. Ghosh, “The Potential of Wound Healing by Microbial Cellulose,” *Int. J. Recent Sci. Res.*, vol. 13, no. 06 (A), pp. 1388–1400, 2022, doi: 10.24327/IJRSR.
- [18] M. Mashuni, *et al.*, “Pemanfaatan Kitosan dari Cangkang Kepiting Bakau (*Scylla serrata*) dengan Metode *Microwave* sebagai Bahan Dasar Kapsul Obat,” *ALCHEMY J. Penelit. Kim.*, vol. 17, no. 1, p. 74, 2021, doi: 10.20961/alchemy.17.1.42038.74-82.
- [19] H. H. Sadiyah, A. I. Cahyadi, and S. Windria, “Kajian Potensi Daun Sirih Hijau (*Piper betle* L) sebagai Antibakteri,” *J. Sain Vet.*, vol. 40, no. 2, p. 128, 2022, doi: 10.22146/jsv.58745.
- [20] D. N. Hapsari, L. Hendrarini, and S. Muryani, “Manfaat Ekstrak Daun Sirih (*Piper betle* Linn) sebagai Han Sanitizer untuk Menurunkan Angka Kuman,” *Sanitasi J. Kesehat. Lingkung.*, vol. 7, no. 2, pp. 79–84, 2015, doi: 10.29238/sanitasi.v7i2.722.
- [21] R. Jannah, “Efektifitas Granuk Ekstrak Daun Sirih Hijau (*Piper betle* linn) Sebagai Bahan Anestesi Alami pada Transportasi Kering Benih Ikan Kakap Putih,” 2024.
- [22] W. Ni Putu Ayu Dewi and S. Eka Indra, “Pengaruh Perbedaan Metode Pengeringan Terhadap Karakteristik Serbuk Ekstrak Kulit Buah Manggis (*Garcia mangostana* (L.)),” 2014.
- [23] S. L. Nail, S. Jiang, S. Chongprasert, and S. A. Knopp, “Fundamentals of Freeze-Drying,” pp. 281–282.
- [24] L. Sjahfirdi, *et al.*, “Aplikasi Fourier Transform Infrared (FTIR) & Pengamatan Pembengkakan Genital pada Spesies Primata, Lutung Jawa (*Trachypithecus auratus*) untuk Mendeteksi Masa Subur,” *J. Kedokt. Hewan - Indones. J. Vet. Sci.*, vol. 9, no. 2, 2015, doi: 10.21157/j.ked.hewan.v9i2.2837.
- [25] H. R. Tang, A. D. Covington, and R. A. Hancock, “Structure-Activity Relationships in the Hydrophobic Interactions of Polyphenols with Cellulose and Collagen,” *Biopolymers*, vol. 70, no. 3, pp. 403–413, 2003, doi: 10.1002/bip.10499.