

Pemanfaatan Air Kelapa dan Tepung Tapioka sebagai Bahan Baku Pembuatan Kertas Ramah Lingkungan dengan Aktivator *Acetobacter Xylinum*

Qadrin Hanan Safida*, Harunsyah, Nahar

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Lhokseumawe, Jl. Medan-B.Aceh Km. 280,2
Lhokseumawe 24301, Indonesia

*E-mail: q.hanansafida13@gmail.com

Abstract

Article history:

Received: 29-09-2025

Accepted: 03-11-2025

Published: 21-12-2025

Keywords:

bacterial;
cellulose;
coconut water;
paper;
tapioca flour.

The use of cellulose derived from wood is increasing every year in Indonesia. This causes environmental damage that occurs continuously. In this research, paper making was carried out using coconut water and tapioca flour as raw materials as well as bacterial cellulose activator so that it is more environmentally friendly. The aim of this research is to determine the effect of variations in the mass of microbial cellulose and tapioca flour on the paper produced. The variables used in this research were the mass of microbial cellulose of 70, 75, 80, 85 90, 85 and 90 grams with variations in tapioca flour adhesive of 10, 15, 20, 25 and 30 grams. Next, the resulting paper is subjected to a grammage test, tensile strength test, water content test, functional group test (FTIR) and SEM test. In the grammage test, variations in the mass of microbial cellulose of 90 grams with a mass of tapioca flour of 30 grams had a higher grammage value than the others, namely 460 g/m². In the tensile strength test, the highest value was in the variation of microbial cellulose mass of 80 grams with a mass of 10 grams of tapioca flour with a value of 0.930522 MPa, while in the water content test the highest value was in the variation of microbial cellulose mass of 90 grams with a mass of 30 grams of tapioca starch with a value of 17.42%.

1. Pendahuluan

Kertas merupakan salah satu kebutuhan dasar manusia dalam berbagai bidang, mulai dari pendidikan, perkantoran, hingga kemasan. Kertas dibuat dari pulp dari serat selulosa yang diperoleh dari tanaman setelah proses delignifikasi, yang merupakan proses penghilangan lignin dari bahan berlignoselulosa[1]. Kertas juga dapat dibuat dari bahan-bahan yang tidak berasal dari kayu, seperti bambu, ampas tebu, kapas, atau jenis tumbuhan lain yang mengandung serat selulosa[2]. Namun, produksi kertas konvensional umumnya sangat bergantung pada bahan baku kayu, yang menimbulkan tekanan terhadap sumber daya hutan dan berdampak negatif terhadap lingkungan melalui deforestasi dan emisi karbon. Oleh karena itu, upaya mencari alternatif bahan baku kertas yang ramah lingkungan menjadi sangat penting[3, 4].

Salah satu alternatif bahan baku yang ramah lingkungan adalah selulosa mikroba atau *bacterial cellulose* yang dihasilkan oleh bakteri *Acetobacter xylinum*, yang memiliki karakteristik unggul seperti struktur serat halus, mekanik kuat, dan bersifat *biodegradable*[5]. Selain itu, limbah pertanian ataupun sumber organik lokal yang murah seperti air kelapa dan tepung tapioka menunjukkan potensi untuk dijadikan

substrat dalam produksi selulosa mikroba karena kandungan karbohidrat dan nutrisi lainnya yang mendukung fermentasi[6].

Air kelapa dan tepung tapioka berperan penting sebagai substrat alami sumber karbon dan nutrisi dalam proses biosintesis selulosa oleh *Acetobacter xylinum*. Bakteri ini merupakan mikroorganisme asam asetat yang mampu mengubah gula sederhana menjadi selulosa murni melalui mekanisme fermentasi aerobik. Selulosa mikroba yang dihasilkan memiliki struktur serat nano berlapis-lapis dan kekuatan mekanik tinggi, sehingga sangat potensial digunakan sebagai bahan dasar kertas ramah lingkungan[7].

Air kelapa mengandung berbagai nutrisi esensial yang mendukung pertumbuhan *A. xylinum*, seperti glukosa, fruktosa, sukrosa, protein, mineral (terutama kalium, natrium, dan magnesium), serta vitamin kelompok B[8]. Kandungan gula total dalam air kelapa berkisar antara 2–5%, yang menjadi sumber karbon langsung bagi proses pembentukan selulosa mikroba[9]. Selain itu, air kelapa memiliki pH alami sekitar 6–7, yang mendekati kondisi optimum pertumbuhan *A. xylinum*. Kandungan mineral dan nitrogen organik di dalamnya juga membantu menjaga kestabilan pH selama fermentasi dan mempercepat pembentukan

matriks selulosa[10]. Oleh karena itu, air kelapa tidak hanya berfungsi sebagai pelarut atau medium cair, tetapi juga sebagai sumber nutrisi penting yang memacu aktivitas metabolik bakteri.

Sementara itu, tepung tapioka berperan sebagai sumber pati yang dapat dihidrolisis menjadi gula sederhana (glukosa) yang kemudian dimanfaatkan oleh *A. xylinum* sebagai bahan baku pembentukan selulosa[11]. Pati dalam tapioka tersusun atas dua komponen utama, yaitu amilosa (20–25%) dan amilopektin (75–80%), yang setelah proses hidrolisis atau gelatinisasi dapat menghasilkan glukosa dalam jumlah cukup tinggi[12]. Pati ini dapat dikonversi menjadi senyawa karbohidrat yang lebih sederhana melalui proses pemanasan atau penambahan enzim, sehingga ketersediaan gula dalam medium fermentasi meningkat. Hal tersebut penting karena produktivitas *bacterial cellulose* sangat bergantung pada konsentrasi gula yang tersedia[13]

Beberapa penelitian terdahulu telah mengeksplorasi pemanfaatan sumber lokal sebagai substrat selulosa mikroba. Limbah tepung tapioka, misalnya, dilaporkan mengandung karbohidrat sebesar 67,93–68,30% yang dapat difermentasi oleh bakteri untuk menghasilkan nata atau selulosa mikroba [14].

Kajian lainnya juga telah dilakukan pada pemanfaatan *Acetobacter xylinum* dalam produksi nata atau selulosa mikroba dari berbagai substrat[15, 16]. Misalnya, penelitian awal yang mengevaluasi pemanfaatan limbah tepung tapioka pada pembuatan *nata de casava* menghasilkan *yield* 63,09%[17].

Demikian pula, penelitian tentang *bacterial nanocellulose* dari air kelapa sebagai pengganti serat panjang dalam pembuatan kertas kemasan makanan menegaskan bahwa selulosa mikroba dari air kelapa mampu meningkatkan sifat mekanik kertas ketika dipadukan dengan serat pendek[18, 19].

Selain itu, kombinasi selulosa *nata* dari *cassava* (yang berkaitan dekat dengan tepung tapioka) dan selulosa tandan kosong kelapa sawit juga telah diuji sebagai substitusi kayu, yang meningkatkan indeks tarik dan ketahanan lipat kertas sambil mengurangi daya serap air[20].

Namun demikian, penelitian yang secara khusus memadukan air kelapa dan tepung tapioka sebagai bahan baku utama dengan

pemanfaatan *Acetobacter xylinum* sebagai aktivator dalam konteks pembuatan kertas ramah lingkungan masih sangat terbatas.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan kombinasi substrat ganda, yakni air kelapa dan tepung tapioka, sebagai bahan baku utama dalam proses fermentasi oleh *Acetobacter xylinum*. Selain itu, penelitian ini tidak hanya berfokus pada produksi *nata* atau selulosa mikroba, tetapi juga langsung diarahkan pada aplikasi pembuatan kertas ramah lingkungan. Evaluasi mutu kertas dilakukan dengan beberapa pengujian karakteristik yang meliputi uji gramatur, uji kuat tarik, uji kadar air, uji analisis gugus fungsi (FTIR), dan uji analisis morfologi (SEM).

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh berat selulosa bakteri dan tepung tapioka terhadap kualitas kertas yang dihasilkan.

2. Metode

2.1 Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah air kelapa tua, urea, glukosa, asam asetat glacial, *starter acetobacter xylinum*, aquadest, kaolin, tepung tapioka, dan tawas.

Sedangkan peralatan yang digunakan adalah *hot plate*, botol kaca, *beaker glass*, bioreaktor, saringan, cawan, timbangan, *blender*, cetakan, oven, *fourier transform infra red (FTIR)*, *scanning electron microscope (SEM)*.

2.2 Prosedur

2.2.1 Pembuatan Starter *Acetobacter Xylinum*

Pembuatan *starter* dilakukan dengan membuat campuran air kelapa sebanyak 2 Liter, 10 gram urea dan 20 gram glukosa sebagai media kultur pembuatan selulosa bakteri. Kemudian media dipanaskan dan diaduk diatas *hotplate* dengan suhu 80 hingga 90 °C dan dilakukan pendinginan hingga suhu ruang. Selanjutnya ditambahkan asam asetat glasial agar pH menjadi 4. *Starter Acetobacter xylinum* ditambahkan sebanyak 200 mL dan diinokulasikan ke dalam media kultur selama 7 hari pada suhu ruang dalam botol kaca yang telah disterilkan.

2.2.2 Pembuatan Selulosa Bakteri

Pembuatan selulosa bakteri dilakukan dengan mencampur air kelapa tua sebanyak 2 Liter, 10 gram urea dan 20 gram glukosa di dalam wadah fermentasi, kemudian

ditambahkan asam asetat glasial sebanyak 10 mL. Selanjutnya ditambahkan *starter acetobacter xylinum* 200 gram dan dialirkan udara ke dalam wadah fermentasi dan dilakukan pengadukan pada kecepatan 100 rpm selanjutnya difermentasi selama 7 hari.

2.2.3 Pembuatan Bubur Kertas Berbahan Dasar Selulosa Bakteri

Perbandingan rasio selulosa bakteri terhadap tepung tapioka sesuai variabel, 0,2 gram kaolin, dan 0,2 gram tawas dicampur dan kemudian dilakukan penghalusan menggunakan blender. Setelah dilakukan penghalusan, *pulp* dicetak pada cetakan dengan ukuran 30 cm x 15 cm x 5 cm. Setelah *pulp* kering, maka dihasilkan kertas selulosa bakteri. Dilanjutkan dengan pengujian gramatur, uji kuat tarik, uji kadar air, uji gugus fungsi FTIR dan uji analisis morfologi dengan SEM

2.2.4 Uji Gramatur

Pengujian gramatur dilakukan dengan prosedur mempersiapkan sampel dengan ukuran 10 cm x 10 cm, kemudian masing-masing sampel ditimbang dengan timbangan analitik dan dicatat massanya.

2.2.5 Pengujian Kuat Tarik

Sampel yang telah dicetak dengan ukuran 10 cm x 10 cm diletakkan pada kedua ujung penjepit pada alat *tensile strenght*. Setelah itu, saklar mesin dan saklar pencatat grafik dihidupkan sesuai dengan kecepatan tarik mesin.

2.2.6 Pengujian Kadar Air

Sampel ditimbang sebanyak 5 gram dalam cawan yang telah dipanaskan untuk mengetahui berat keringnya. Sampel dipanaskan dalam oven pada suhu 105 °C sampai beratnya konstan, dan kemudian dimasukkan kedalam desikator selama 30 menit, selanjutnya ditimbang kembali untuk mengetahui kadar airnya.

2.2.7 Pengujian Gugus Fungsi (FTIR)

Untuk menganalisis sampel serbuk (padatan), panjang gelombang inframerah 600 cm⁻¹-4000 cm⁻¹ digunakan. KBr digunakan sebagai background. Dengan menggunakan mortar, 5% berat sampel dihomogenkan dengan 95% KBr dan kemudian ditekan sehingga berbentuk *pellet*.

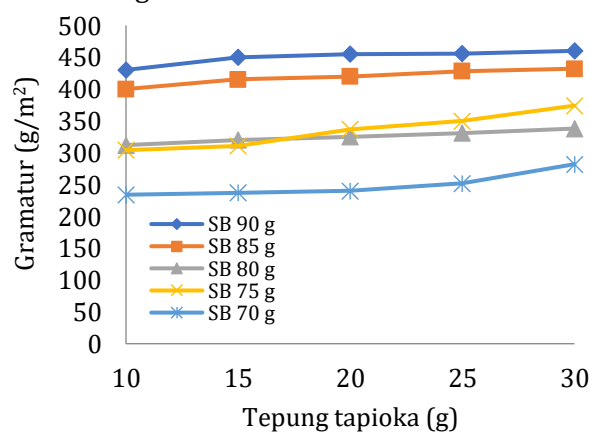
2.2.8 Pengujian Morfologi

Analisis morfologi permukaan dan struktur serat kertas ramah lingkungan berbasis selulosa mikroba dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy (SEM)*. Sampel kertas atau film selulosa yang telah dikeringkan dengan metode *freeze-drying* dipotong berukuran 5 × 5 mm, kemudian ditempelkan pada *sample stub* menggunakan pita karbon konduktif. Pengamatan dilakukan menggunakan SEM pada tegangan percepatan 5–15 kV dengan *working distance* 5–10 mm. Detektor *secondary electron (SE)* digunakan untuk memperoleh citra morfologi permukaan, sedangkan *backscattered electron (BSE)* digunakan untuk mengamati kontras komposisi material. Pengamatan dilakukan pada beberapa titik representatif dengan variasi perbesaran antara 100× hingga 1500× guna mengidentifikasi karakteristik serat, kerapatan jaringan, dan distribusi pori dari hasil kombinasi substrat air kelapa dan tepung tapioka yang difermentasi oleh *Acetobacter xylinum*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengaruh Berat Selulosa Bakteri dan Berat Tepung Tapioka terhadap Gramatur Kertas

Pengaruh berat selulosa bakteri dan berat tepung tapioka terhadap gramatur kertas dapat dilihat pada Gambar 1. Gramatur merupakan massa lembaran kertas dalam gram dibagi dengan satuan luasnya dalam meter persegi, sesuai dengan metode SNI 14-0440-2006.



Gambar 1. Pengaruh variasi berat tepung tapioka terhadap gramatur kertas

Gambar 1 memperlihatkan pengaruh penambahan berat tepung tapioka terhadap gramatur kertas biokomposit pada berbagai variasi berat selulosa bakteri (SB). Secara umum

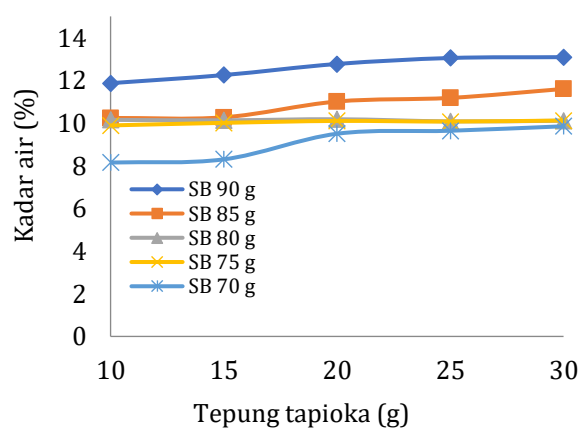
terlihat bahwa semakin banyak tepung tapioka yang digunakan (10–30 g), gramatur kertas meningkat pada semua level SB. Hal ini menunjukkan bahwa tapioka berperan penting sebagai bahan pengikat alami yang mampu menambah densitas, mengisi pori-pori, dan memperkuat struktur kertas, sehingga bobot per satuan luas (gramatur) bertambah[21]. Pada penggunaan SB 90 g, gramatur mencapai nilai tertinggi yaitu sekitar 430–450 g/m², sedangkan SB 85 g sedikit lebih rendah dengan kisaran 400–420 g/m². Kondisi ini menunjukkan bahwa kontribusi selulosa bakteri sebagai matriks utama pembentuk jaringan kertas sudah sangat dominan, sehingga penambahan tapioka hanya memberi pengaruh peningkatan yang relatif kecil. Sebaliknya, pada SB 70 g dan 75 g yang menghasilkan gramatur paling rendah (250–360 g/m²), penambahan tapioka memberikan efek peningkatan yang lebih nyata. Hal ini menandakan bahwa pada kadar selulosa yang rendah, keberadaan tapioka berperan lebih signifikan dalam memperbaiki struktur dan meningkatkan massa lembaran kertas biokomposit.

Pola tersebut mengindikasikan adanya interaksi sinergis antara selulosa bakteri dan tepung tapioka dalam menentukan kualitas fisik kertas. Selulosa bakteri menyediakan kerangka jaringan yang kuat dan berpori, sedangkan tapioka berfungsi sebagai pengisi (*filler*) dan perekat alami yang menutup celah dan meningkatkan kerapatan serat[22]. Dengan demikian, semakin tinggi jumlah SB, semakin besar kekuatan dasar kertas yang dihasilkan, sedangkan penambahan tapioka lebih efektif pada SB rendah karena berfungsi mengompensasi kekurangan massa dan densitas serat. Hasil ini sejalan dengan temuan yang melaporkan bahwa kombinasi selulosa dan pati mampu menghasilkan *biopaper* dengan gramatur dan sifat mekanik lebih baik dibanding penggunaan selulosa murni[23]. Oleh karena itu, rasio optimum antara selulosa bakteri dan tepung tapioka menjadi aspek krusial dalam pengembangan kertas biokomposit ramah lingkungan dengan karakteristik gramatur yang sesuai kebutuhan

3.2 Pengaruh Berat Selulosa Bakteri dan Berat Tepung Tapioka terhadap Kadar Air Kertas

Pengaruh berat selulosa bakteri dan berat tepung tapioka terhadap kadar air dapat dilihat

pada Gambar 2. Gambar tersebut menunjukkan pengaruh variasi berat tepung tapioka (10–30 g) terhadap kadar air kertas biokomposit pada berbagai jumlah selulosa bakteri (SB). Secara umum, kadar air meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah tepung tapioka, meskipun kenaikannya relatif kecil. Hal ini dapat dijelaskan oleh sifat hidrofilik dari pati, termasuk tapioka, yang cenderung mengikat air karena memiliki gugus hidroksil yang mudah membentuk ikatan hidrogen dengan molekul air[24, 25]. Dengan demikian, semakin banyak tepung tapioka yang ditambahkan, semakin tinggi pula kemampuan kertas dalam menyerap dan mempertahankan kadar air.



Gambar 2. Pengaruh berat selulosa bakteri dan berat tepung tapioka terhadap kadar air kertas

Pada SB 90 g, kadar air tercatat paling tinggi yaitu sekitar 12–13%, dan menunjukkan peningkatan bertahap dengan penambahan tapioka. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun selulosa bakteri sudah berfungsi sebagai material dengan daya serap air yang signifikan, keberadaan tapioka menambah kemampuan jaringan untuk menahan kelembaban. Pada SB 85 g juga memperlihatkan tren serupa dengan kadar air berada pada kisaran 10–11%, lebih rendah dari SB 90 g namun tetap mengalami kenaikan seiring dengan penambahan tapioka.

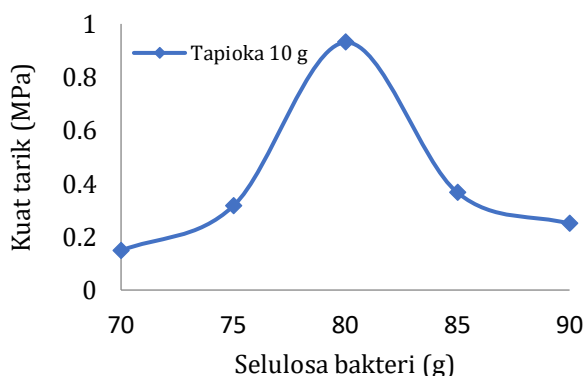
Sementara itu, pada SB rendah (70–75 g), kadar air cenderung stabil pada kisaran 9–10% dan peningkatannya tidak terlalu signifikan. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh berkurangnya matriks selulosa bakteri yang berperan dalam membentuk jaringan berpori yang dapat menahan air. Dengan kata lain, pada kadar SB yang rendah, penambahan tapioka hanya memberikan kontribusi terbatas karena

struktur kertas kurang rapat, sehingga kapasitas menahan air relatif lebih rendah[26].

Hasil ini menunjukkan adanya hubungan sinergis antara selulosa bakteri dan tepung tapioka dalam menentukan kadar air kertas biokomposit. Pada SB tinggi, tapioka memperkuat sifat hidrofilik kertas sehingga kadar air meningkat, sedangkan pada SB rendah, efek tapioka terhadap kadar air lebih terbatas. Implikasi dari temuan ini adalah bahwa peningkatan kadar air berpotensi memengaruhi stabilitas dimensi dan ketahanan mekanik kertas, sehingga perlu diperhatikan dalam formulasi komposisi bahan. Secara keseluruhan, optimasi rasio SB dan tapioka tidak hanya penting untuk menentukan gramatur, tetapi juga kadar air yang sesuai dengan standar penyimpanan dan penggunaan kertas biokomposit berbasis bahan alam.

3.3 Pengaruh Berat Selulosa Bakteri dan Berat Tepung Tapioka terhadap Kuat Tarik Kertas

Pengaruh berat selulosa bakteri dan berat tepung tapioka terhadap kuat tarik kertas diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Pengaruh berat selulosa bakteri dan berat tepung tapioka terhadap kuat tarik kertas

Gambar 3 menunjukkan pengaruh variasi berat selulosa bakteri (SB) terhadap kuat tarik kertas biokomposit pada kondisi penambahan tepung tapioka sebanyak 10 g. Secara umum, kuat tarik meningkat seiring dengan bertambahnya berat selulosa bakteri hingga mencapai titik optimum, kemudian menurun kembali pada SB yang lebih tinggi. Nilai kuat tarik terendah ditunjukkan pada SB 70 g dengan kekuatan sekitar 0,15 MPa, kemudian meningkat signifikan hingga mencapai nilai maksimum mendekati 0,9 MPa pada SB 80 g. Setelah titik

optimum tersebut, kuat tarik kembali menurun, menjadi sekitar 0,3–0,2 MPa pada SB 85–90 g.

Kecenderungan ini menunjukkan adanya hubungan non-linear antara jumlah selulosa bakteri dan kuat tarik material. Pada kadar SB rendah, jumlah serat selulosa yang terbatas belum mampu membentuk jaringan yang kuat sehingga ikatan antar serat masih lemah. Peningkatan jumlah SB hingga 80 g memperbaiki kekuatan tarik karena selulosa bakteri memiliki kemampuan membentuk struktur nanofiber dengan kristalinitas tinggi serta luas permukaan spesifik yang besar, yang mampu meningkatkan ikatan hidrogen antar serat serta memperkuat matriks biokomposit. Namun, pada SB yang terlalu tinggi (85–90 g), terjadi penurunan kuat tarik. Hal ini dapat disebabkan oleh distribusi serat yang tidak merata, meningkatnya densitas yang menyebabkan sifat getas, atau terbatasnya jumlah tapioka (10 g) untuk berfungsi sebagai *binder* yang cukup mengikat seluruh selulosa, sehingga sebagian serat tidak berkontribusi optimal dalam memperkuat struktur.

Fenomena serupa juga menyatakan bahwa penambahan selulosa ke dalam komposit berbasis pati meningkatkan kekuatan mekanik hingga titik optimum, namun kelebihan selulosa dapat menimbulkan aglomerasi serat yang justru menurunkan sifat mekanik[27]. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa rasio optimal antara selulosa bakteri dan tapioka sangat penting untuk memperoleh kertas biokomposit dengan kekuatan tarik terbaik. Pada penelitian ini, kondisi optimum terjadi pada SB 80 g dengan tapioka 10 g, yang menghasilkan kuat tarik hampir 1 MPa, menunjukkan adanya keseimbangan yang ideal antara jumlah serat penguat (selulosa bakteri) dan matriks pengikat (tapioka).

3.4 Analisa Gugus Fungsi (FTIR)

Gambar 4 menunjukkan hasil karakterisasi FTIR sampel kertas selulosa bakteri yang dilakukan dengan menggunakan FTIR pada rentang 450 – 4000 cm^{-1} .

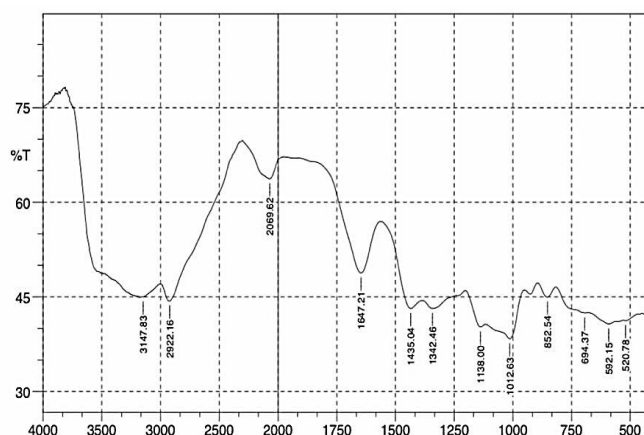
Hasil analisis FTIR pada Gambar 4 menunjukkan adanya berbagai pita serapan khas yang mengindikasikan keberadaan gugus fungsi utama penyusun biopolimer selulosa. Puncak serapan kuat pada daerah sekitar 3.174,83 cm^{-1} menunjukkan adanya getaran regangan -OH (hidroksil) yang berasal dari gugus alkohol dan air terikat pada struktur selulosa mikroba. Puncak ini merupakan ciri

khas bahan berselulosa dan menandakan kemampuan membentuk ikatan hidrogen antarmolekul. Serapan pada $2.922,16\text{ cm}^{-1}$ berkaitan dengan getaran regangan C-H alifatik dari gugus metil dan metilen, yang umumnya terdapat pada rantai utama glukosa dalam selulosa. Adanya pita pada $2.906,02\text{ cm}^{-1}$ juga memperkuat indikasi kehadiran gugus C-H yang berasal dari komponen organik seperti tapioka atau residu polisakarida.

Selanjutnya, pita serapan pada $1.647,21\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan adanya getaran lentur -OH dari air yang terikat secara fisik di dalam matriks selulosa atau kemungkinan adanya gugus karbonil (C=O) dari sisa senyawa organik yang belum sepenuhnya terfermentasi oleh *Acetobacter xylinum*. Puncak pada $1.435,08\text{ cm}^{-1}$ dan $1.342,46\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan getaran lentur C-H serta regangan C-O dari gugus alkohol sekunder pada struktur glukopiranososa, yang merupakan karakteristik khas selulosa. Pita di daerah $1.139,00\text{ cm}^{-1}$ dan $1.026,63\text{ cm}^{-1}$ berkaitan dengan regangan C-O-C dan C-O dari ikatan glikosidik antara unit β -D-glukosa, menandakan terbentuknya struktur polimer selulosa yang kuat.

Sementara itu, puncak pada $892,54\text{ cm}^{-1}$ dikaitkan dengan getaran ulur β -glikosidik (β -1,4 linkage) yang menandakan terbentuknya struktur khas selulosa, sedangkan pita pada $694,37\text{ cm}^{-1}$ dan $520,76\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan getaran ikatan C-H luar bidang (*out-of-plane bending*) yang umum dijumpai pada polisakarida alami. Keseluruhan spektrum ini menunjukkan bahwa produk yang dihasilkan dari fermentasi campuran air kelapa dan tepung tapioka dengan aktivator *Acetobacter xylinum* mengandung gugus fungsi khas selulosa tanpa adanya puncak signifikan dari gugus karbonil bebas (C=O) yang biasanya ditemukan pada senyawa amilosa atau pati mentah.

Dengan demikian, hasil FTIR ini menegaskan bahwa proses fermentasi telah berhasil mengkonversi komponen karbohidrat dari air kelapa dan tepung tapioka menjadi selulosa mikroba. Kehadiran pita serapan khas selulosa seperti -OH, C-H, dan C-O-C menandakan integritas struktur polimer yang baik dan mendukung pembentukan kertas ramah lingkungan berbasis selulosa mikroba dengan kemurnian tinggi.



Gambar 1. Hasil uji gugus fungsi (FTIR) kertas selulosa bakteri

3.5 Analisa Morfologi (SEM)

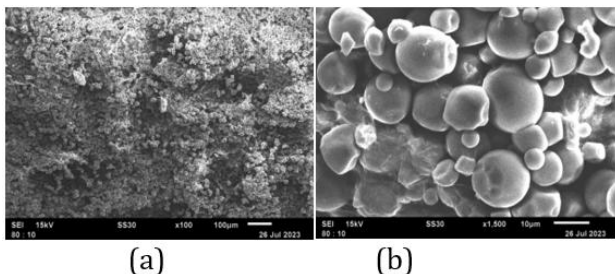
Gambar 5 memperlihatkan morfologi kertas selulosa bakteri dipengaruhi oleh komposisi bahan penyusun yang termasuk kaolin, tapioka, dan sedikit tawas sebagai pemutih. Secara visual salah satu hasil *scanning electron microscopy* kertas selulosa bakteri dari komposisi terbaik yakni rasio antara selulosa bakteri dan tepung tapioka yaitu 90 : 10 gram yang ditambahkan terlihat bahwa adanya pati tapioka dengan bentuk gumpalan yang berfungsi sebagai perekat untuk kertas selulosa bakteri.

Hasil pengamatan morfologi permukaan menggunakan *Scanning Electron Microscopy (SEM)* pada Gambar 5 menunjukkan perbedaan yang signifikan antara struktur kertas ramah lingkungan yang dihasilkan dari fermentasi *Acetobacter xylinum* dengan substrat air kelapa dan tepung tapioka. Pada Gambar 5(a) dengan perbesaran 100 \times , tampak bahwa permukaan sampel memiliki morfologi yang tidak homogen dan berpori dengan distribusi serat yang tidak merata. Struktur ini menunjukkan bahwa proses pembentukan jaringan selulosa mikroba masih berlangsung sebagian dan belum sepenuhnya mengalami penataan fibril yang teratur.

Sementara itu, Gambar 5(b) dengan perbesaran 1.500 \times memperlihatkan morfologi yang lebih halus dengan bentuk partikel menyerupai bola dan berukuran mikron. Struktur ini mengindikasikan adanya partikel selulosa mikroba yang mulai teragregasi membentuk jaringan tiga dimensi akibat pertumbuhan *Acetobacter xylinum* yang mengubah gula dari substrat menjadi fibril selulosa. Permukaan partikel tampak relatif padat dan halus, menunjukkan bahwa sebagian

besar senyawa polisakarida telah mengalami proses polimerisasi yang baik. Kehadiran partikel berbentuk bulat juga dapat disebabkan oleh kontribusi komponen tepung tapioka yang mengalami gelatinisasi dan berinteraksi dengan mikrofibril selulosa, sehingga menghasilkan morfologi campuran antara jaringan serat dan granula polisakarida[28].

Secara keseluruhan, hasil SEM menunjukkan bahwa kombinasi substrat air kelapa dan tepung tapioka memengaruhi pembentukan morfologi selulosa mikroba. Air kelapa berperan sebagai sumber karbon sederhana yang mudah dikonversi menjadi fibril selulosa, sedangkan tepung tapioka berkontribusi terhadap peningkatan densitas dan viskositas medium, yang pada akhirnya menghasilkan tekstur permukaan dengan struktur lebih padat dan membulat. Perbedaan ini menunjukkan interaksi kompleks antara sumber karbon alami dan aktivitas mikroba selama proses biosintesis, yang berdampak langsung terhadap sifat fisik dan mekanik kertas ramah lingkungan yang dihasilkan.



Gambar 5. Hasil *Scanning Electron Microscopy (SEM)* (a) dengan pembesaran 100x, (b) dengan pembesaran 1.500x

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa air kelapa dan tepung tapioka dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku alternatif dalam pembuatan kertas ramah lingkungan melalui proses biosintesis selulosa mikroba dengan aktivator *Acetobacter xylinum*. Variasi massa selulosa mikroba dan tepung tapioka memberikan pengaruh nyata terhadap sifat fisik kertas yang dihasilkan, meliputi gramatur, kekuatan tarik, dan kadar air. Hasil uji menunjukkan bahwa variasi dengan massa selulosa mikroba 90 gram dan tepung tapioka 30 gram menghasilkan nilai gramatur tertinggi sebesar 460 g/m², menandakan peningkatan kerapatan dan ketebalan lembaran kertas.

Pada uji kekuatan tarik, komposisi 80 gram selulosa mikroba dan 10 gram tepung tapioka memberikan nilai tertinggi sebesar 0,930522 MPa, yang menunjukkan bahwa jumlah perekat yang terlalu tinggi dapat menurunkan elastisitas dan homogenitas struktur serat. Sedangkan pada uji kadar air, komposisi 90 gram selulosa mikroba dan 30 gram tepung tapioka menghasilkan nilai tertinggi sebesar 17,42%, mengindikasikan kemampuan penyerapan air yang lebih besar akibat peningkatan jumlah gugus hidroksil dari pati.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada seluruh pihak yang terlibat dalam penulisan artikel ini, baik secara langsung maupun tidak langsung.

Daftar Pustaka

- [1] Dewi, I. A., Ihwah, A., Setyawan, H. Y., Kurniasari, A. A. N., & Ulfah, A., 2019. *Optimasi proses delignifikasi pelepah pisang untuk bahan baku pembuatan kertas seni*. Sebatik, Vol. 23, No. 2, pp. 447-454.
- [2] Putri, A. H., Hasibuan, N., & Hawari, F., 2019. *Kajian industri pulp dan kertas di indonesia*. OSF, Vol. 5, No. 2, pp. 79-88.
- [3] Nairfana, I., Afgani, C. A., & Munandar, I., 2023. *Inovasi kemasan kertas benih ramah lingkungan berbahan dasar kulit jagung dan ampas tebu*. Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi, Vol. 11, No. 1, pp. 375-385.
- [4] Rangkuti, R. M. R., Septiandini, E., & Purnomo, A., 2024. *Analisis pemanfaatan limbah kertas bekas dan ampas tebu sebagai material alternatif pembuatan dinding partisi ramah lingkungan*. Jurnal TESLINK: Teknik Sipil dan Lingkungan, Vol. 6, No. 1, pp. 45-49.
- [5] Maryam, M., Rahmad, D., & Yunizurwan, Y., 2019. *Sintesis mikro selulosa bakteri sebagai penguat (reinforcement) pada komposit bioplastik dengan matriks pva (polyvinyl alcohol)*. Indonesian Journal of Industrial Research, Vol. 41, No. 2, pp. 110-118.
- [6] Ahmad, S. W., Yanti, N. A., & Muhiddin, N. H., 2019. *Pemanfaatan limbah cair sagu untuk memproduksi selulosa bakteri*. Jurnal Biologi Indonesia, Vol. 15, No. 1.

- [7] Lahiri, D. et al., 2021. *Bacterial cellulose: Production, characterization, and application as antimicrobial agent*. International journal of molecular sciences, Vol. 22, No. 23, p. 12984.
- [8] Deswarni, D.& Febrina, W., 2023. *Pemanfaatan limbah air kelapa untuk industri kecil di pedesaan*. Masyarakat Berdaya dan Inovasi, Vol. 4, No. 2, pp. 160-168.
- [9] Sipahutar, A. S., Elwina, E., & Zulkifli, Z., 2024. *Pengaruh jenis gula dan waktu fermentasi terhadap kualitas minuman fermentasi kombucha air kelapa*. Jurnal Riset, Inovasi, Teknologi & Terapan, Vol. 2, No. 2, pp. 53-57.
- [10] Toruan, S. A. L., Manu, T. T., & Evriarti, P. R., 2023. *Pemanfaatan air kelapa muda sebagai media alternatif mac concey untuk pertumbuhan escherichia coli dan salmonella typhi*. Journal of Indonesian Medical Laboratory and Science (JoIMedLabS), Vol. 4, No. 1, pp. 25-36.
- [11] Muchtar, L., Mubarik, N. R., & Suwanto, A., 2017. *Konsistensi produksi nata dalam media fermentasi yang mengandung hidrolisat ubi kayu*. Jurnal Teknologi Industri Pertanian, Vol. 27, No. 2.
- [12] Muchsiri, M., Sylviana, S., & Martensyah, R., 2021. *Pemanfaatan pati ganyong sebagai substitusi tepung tapioka pada pembuatan pempek ikan gabus (channa striata)*. Edible: Jurnal Penelitian Ilmu-ilmu Teknologi Pangan, Vol. 10, No. 1, pp. 17-19.
- [13] Muhsinin, S.& Roni, A., 2021. *Produksi, karakterisasi dan aplikasi selulosa bakteri di bidang farmasi*. JOPS (Journal of Pharmacy and Science), Vol. 4, No. 2, pp. 12-28.
- [14] Naryamajati, A. T., Rohmah, L. F., Vivianti, A. A., Sasmito, D. P., Chhetri, V., & Hamad, A., 2024. *The flour source's role as a fermentation substrate influences the physical attributes of nata de coco*. Research in Chemical Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 08-12.
- [15] Liany, S. A., Syafira, W., Putri, A., & Khasanah, A. U., 2022. *Effect of bacterial cellulose (BC) formation on various substrate variations and combinations*. Berkala Ilmiah Biologi, Vol. 13, No. 2, pp. 13-20.
- [16] Najri, M., Antara, N. S., & Wijaya, I. M., 2022. *Pengaruh penambahan gula dan lama fermentasi terhadap karakteristik selulosa bakteri dari kulit pisang kepok (musa paradisiaca l.)*. Jurnal Rekayasa Dan Manajemen Agroindustri, Vol. 10, No. 2, pp. 211-220.
- [17] Alfarisi, C. D., Zahrina, I., & Mutamima, A., 2021. *Pembuatan nata de cassava dari limbah cair tapioka dengan menggunakan sumber nitrogen alami yang berbeda*. Jurnal Ilmiah Pertanian, Vol. 17, No. 2, pp. 93-100.
- [18] Swara, D. P., Harunsyah, H., & Fachraniah, F., 2024. *Pemanfaatan selulosa bakteri sebagai bahan baku pembuatan kertas ramah lingkungan*. Jurnal Teknologi, Vol. 24, No. 2, pp. 129-135.
- [19] Kamarudin, N. S., Rahman, N. A., Kalil, M. S., Kamarudin, S. K., & Esa, F., 2019. *Penghasilan selulosa bakteri yang ekonomik daripada air kelapa tua*. Malaysian Applied Biology, Vol. 48, No. 2, pp. 83-87.
- [20] Dharosno, W. W.& Pundu, A., 2020. *Analisa kuat tarik pada kertas berbahan dasar serat daun nanas*. J. Teknol. dan Rekayasa, Vol. 5, No. 1, pp. 46-56.
- [21] Julieta, K., Zulferiyenni, Z., Nurainy, F., & Hidayati, S., 2025. *Karakteristik kemasan bioplastik berbasis daun pandan (pandanus amaryllifolius roxb.) dengan penambahan tapioka dan minyak sawit*. Jurnal Agroindustri Berkelanjutan, Vol. 4, No. 1, pp. 133-146.
- [22] Nurhajati, D. W., Indrajati, I. N., Mayasari, H. E., & Sholeh, M., 2019. *Pengaruh penambahan pati tapioka terhadap sifat mekanis dan struktur komposit high density polyethylene*. Majalah Kulit, Karet, dan Plastik, Vol. 34, No. 2, pp. 77-84.
- [23] Amalia, S. R., Harizar, S. M., Maesyaroh, S., & Rahmawati, S., 2025. *Artikel review: Analisis komparatif bahan tambahan dalam peningkatan kinerja bioplastik pati jagung*. Botani: Publikasi Ilmu Tanaman dan Agribisnis, Vol. 2, No. 2, pp. 167-175.
- [24] Sriyana, H. Y.& Indrasmara, B. P., 2022. *Bioplastik berbahan dasar tepung tapioka dengan modifikasi gliserin dan serat bambu*. Chimica et Natura Acta, Vol. 10, No. 2, pp. 60-65.

- [25] Larasati, D. A., Yuliasih, I., & Sunarti, T. C., 2017. *Desain proses pembuatan coating film berbasis pati sagu (metroxylon sp.) ikat silangasam sitrat*. Jurnal Teknologi Industri Pertanian, Vol. 27, No. 3.
- [26] Ardiani, S., Rahmayanti, H., & Akmalia, N., 2020. *The study of paper capillarity with a simple technique*. Jurnal Ilmiah Publipreneur, Vol. 8, No. 1, pp. 34-47.
- [27] DAN, P. N., 2020. *Sintesa komposit bioplastik pati kulit singkong-partikel nanosilika dan karakterisasinya*. Jurnal Kimia dan Kemasan, Vol. 42, No. 2, pp. 37-45.
- [28] Kristianto, H., Jennifer, A., Sugih, A. K., & Prasetyo, S., 2020. *Potensi polisakarida dari limbah buah-buahan sebagai koagulan alami dalam pengolahan air dan limbah cair*. Jurnal Rekayasa Proses, Vol. 14, No. 2, pp. 108-127.