

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI KOMPOSIT
SILIKA-POLIVINIL ALKOHOL BERBASIS
BACTERIAL CELLULOSE LIMBAH CAIR TAHU**

Ni Wayan Siska Dewi¹, Sudirman¹, Ni Komang Tri Dharmayani¹, Emmy
Yuanita¹, dan Maria Ulfa^{1*}

Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat, 83315, Indonesia.

*Correspondent author : ulfaarief@unram.ac.id

ABSTRAK

Selulosa bakteri telah banyak diteliti dan dikembangkan sebagai pengganti komposit komersil yang ramah lingkungan dengan aplikasi di berbagai bidang. Penelitian tentang sintesis dan karakterisasi komposit SiO₂-PVA berbasis selulosa bakteri limbah cair tahu telah dilakukan. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh komposisi *nutrient*, SiO₂ dan PVA terhadap karakterisasi komposit. Sintesis komposit dilakukan dengan metode *in situ* dengan menambahkan suspensi SiO₂ (0,5 %) dan larutan PVA (0,5 %) ke dalam *nutrient* selulosa bakteri dengan berbagai komposisi dan difermentasi selama 7 dan 8 hari dengan bantuan *Glucenobacter xylinus*. Berdasarkan hasil karakterisasi perbandingan *nutrient*, SiO₂, dan PVA dapat meningkatkan porositas, elektrolit, konduktivitas, dan uji mekanik.

Kata kunci : Selulosa bakteri, limbah cair tahu, *in-situ*, BC-SiO₂-PVA.

ABSTRACT

Bacterial cellulose has been extensively researched and developed as an environmentally friendly substitute for commercial composites with applications in various fields. Research on the synthesis and characterization of bacterial cellulose based SiO₂-PVA composites in tofu wastewater has been conducted. This study aimed to analyze the effect composition of nutrient, SiO₂ and PVA on the characterization of the composites. Synthesis composite was carried out by *in situ* method by adding suspension SiO₂ (0.5%) and solution PVA (0.5%) into bacterial cellulose nutrition with various compositions and fermented for 7 and 8 days with *Glucenobacter xylinus*. Based on the characterization results comparison of nutrient, SiO₂, and PVA can increase porosity, electrolyte, conductivity, and mechanical tests.

Keywords : Bacterial cellulose, tofu liquid waste, *in-situ*, BC-SiO₂-PVA

Pendahuluan

Selulosa bakteri (BC) menjadi salah satu membran dari polimer alam yang banyak dikembangkan karena sifatnya yang lebih baik dibandingkan membran yang dihasilkan dari polimer sintesis (Sukarta, 2020). Selulosa bakteri memiliki sifat ramah lingkungan, kadar air tinggi (98 - 99 %), penyerapan cairan yang baik, permeabilitas tinggi dan dapat disterilisasikan tanpa merubah struktur dan sifat yang dimilikinya (Keshk, 2014). Pemanfaatan selulosa bakteri semakin beragam seiring dengan perkembangan waktu.

Aplikasi BC dapat meliputi separator baterai (Costa *et al.*, 2019), komposit film (Hidayati *et al.*, 2019; Ullah *et al.*, 2016), absorben tumpahan minyak (Mahardhika & Muldarisnur, 2021), membran filtrasi logam berat (Urbina *et al.*, 2018), pembalut luka (Hodel *et al.*, 2022; Wahid *et al.*, 2021; Zhou, 2016), *food packaging* (Amorim *et al.*, 2022), *drug delivery system* (Badshah *et al.*, 2018), penstabil emulsi (Novikov *et al.*, 2021), masker wajah (Pacheco *et al.*, 2018; Perugini *et al.*, 2018). Selulosa bakteri disintesis dengan mikroorganisme seperti *Acetobacter*

xylinus, *Glucenobacter xylinus* dan *Glucenobacter hansenii* (Alwi *et al.*, 2011; Costa *et al.*, 2017; Gomes *et al.*, 2013). Selulosa bakteri dapat dibuat dari limbah dan *non* limbah yang dikondisikan (Alwi *et al.*, 2011; Galdino *et al.*, 2020).

Selulosa bakteri ini dapat dibuat dari berbagai limbah salah satunya limbah cair tahu (Alwi *et al.*, 2011; Nisa, 2002; Rahadi *et al.*, 2020). Limbah cair tahu baik digunakan sebagai media pertumbuhan bakteri *Acetobacter xylinus* dan *Glucenobacter xylinus* dikarenakan banyak mengandung unsur mineral, protein, karbohidrat, dan lemak untuk pembentukan selulosa (Alwi, 2008; Jia *et al.*, 2016). Limbah cair tahu yang disintesis menjadi BC yang dapat digunakan di berbagai aplikasi. Hal ini dikarenakan limbah tahu mengandung kadar selulosa yang tinggi (Rahadi *et al.*, 2020). Selulosa bakteri berbasis limbah cair tahu memiliki kekurangan berupa ketahanan air yang rendah, mudah rapuh, stabilitas yang rendah sehingga mudah terdegradasi dan memiliki sifat mekanik yang kurang baik (Jabeen *et al.*, 2015). Oleh sebab itu, diperlukan pengembangan BC

melalui penambahan *filler* pada selulosa untuk meningkatkan sifat fisik komposit sehingga menghasilkan kualitas yang baik.

Filler yang tidak larut dalam air selama proses *in-situ* tidak mempengaruhi BC akan tetapi mengubah morfologi dan kristalinitas BC (Jiang *et al.*, 2017). Selulosa bakteri yang ditambahkan SiO₂ dan polivinil alkohol (PVA) (BC-SiO₂-PVA) terbuat dari penggabungan *in-situ* dengan penambahan *filler* yang terjerat pada BC dan meningkatkan sifat fisik dan mekanik komposit BC (Saibuatong & Philsalaphong, 2010; Jiang *et al.*, 2017). Selulosa bakteri memiliki membran berpori dan struktur retikuler dengan pori kecil yang baik untuk proses penyaringan (Wu *et al.*, 2013). Komposit BC-SiO₂ menghasilkan struktur 3D dengan permukaan yang berpori tersusun secara merata akibat penambahan SiO₂ sehingga menghasilkan porositas dan fluks air yang tinggi (Lv *et al.*, 2017; Shi *et al.*, 2013). Komposit BC-PVA menunjukkan adanya serat bertumpuk yang tidak beraturan akibat penambahan PVA pada BC. Polivinil alkohol memiliki keterbasahan selektif yang tinggi,

larut dalam air, membentuk film yang baik dan *biocompatible* (Tai *et al.*, 2022). Komposit BC-SiO₂-PVA diharapkan mampu meningkatkan sifat fisik BC.

Komposit BC-SiO₂ dibuat dengan polikondensasi secara *in-situ* prekursor silika dengan selulosa bakteri (Sai *et al.*, 2013; Yano *et al.*, 2008). Komposit BC-PVA dibuat dengan metode *in-situ* dengan menambahkan selulosa pada larutan PVA kemudian di *stirrer* selama 12 jam. Komposit BC-PVA yang dihasilkan memiliki karakterisasi komposit yang lebih tinggi dibandingkan dengan BC (Qiao *et al.*, 2015). Sharma *et al.* (2021) dalam penelitiannya melakukan penambahan *filler* TiO₂ dan PVA pada BC dengan metode *solution casting* yang menghasilkan BC-TiO₂-PVA sehingga mampu meningkatkan karakterisasi konduktivitas termal komposit. Penelitian yang dilakukan Gea *et al.* (2010) membuat komposit BC-PVA dengan metode *in-situ* dan *ex-situ* menghasilkan morfologi distribusi *filler* yang lebih merata diperoleh pada komposit yang dibuat menggunakan metode *in-situ*.

Berdasarkan uraian di atas, pada penelitian ini dilakukan sintesis dan karakterisasi BC dan komposit BC-SiO₂-PVA dengan variasi penambahan *nutrient* BC, SiO₂ dan PVA secara *in-situ* mengacu pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Syamsu & Kuryani, 2014; Urbina *et al.*, 2018; Sharma *et al.*, 2021), menggunakan bakteri *Gluconacetobacter xylinus* berbasis media limbah cair tahu. Komposit hasil sintesis kemudian dikarakterisasi secara kimia dan fisik untuk mengetahui potensinya.

Metedologi Penelitian

Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah : Cawan petri, gelas kimia, erlenmeyer, *hot plate*, batang pengaduk, aluminium foil, pipet volume, *rubber bulb*, *autoclave*, kompor listrik, loyang plastik, panci *stainless steel*, saringan kain, derijen, spatula, corong kaca, SEM, oven, *power suplay*, alat ukur ketebalan, timbangan analitik dan tensilon RTG-1310.

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah : limbah cair tahu (diperoleh dari industri tahu

di Abian Tubuh, Mataram, NTB) air kelapa, Amonium sulfat (NH₄)₂SO₄, gula (merek Gulaku), *yeast extract* (diperoleh di Laboratorium Mikrobiologi Pertanian Universitas Mataram), *G. xylinus* (diperoleh dari Laboratorium Biologi Lanjut), Silika dioksida (SiO₂), Polivinil alkohol (PVA), Natrium hidroksida (NaOH), Metanol (CH₃OH), Aquades (H₂O), tisu, pH *stick*, benang kasur, kertas coklat dan kertas saring.

Prosedur Penelitian

Pembuatan starter bakteri

Pembuatan *starter* bakteri pada penelitian ini mengikuti prosedur yang dilakukan oleh Syamsu & Kuryani (2014). *Starter* bakteri dibuat menggunakan bahan baku air kelapa. Proses pembuatan *starter* bakteri *G. xylinus* dilakukan dengan menambahkan *nutrient* yang terdiri dari gula pasir, ammonium sulfat, dan *yeast extract* masing masing sebanyak 10; 0,5; dan 0,5 % (b/v) kemudian dimasukkan ke dalam gelas erlenmeyer 1 L. Air kelapa yang sudah disaring ditambahkan pada *nutrient* hingga volume larutan mencapai tanda batas. Campuran diaduk hingga semua bahan larut

sempurna dan disterilisasi dalam *autoclave* pada suhu 121 °C dengan tekanan 2 atm selama 2 jam kemudian didinginkan. Bakteri *G. xylinus* sebanyak 10 % (v/v) ditambahkan ke dalam media yang sudah dibuat dan diinkubasi selama 3 hari.

Pembuatan suspensi SiO₂ dan larutan PVA

Suspensi SiO₂ (0,5 %) dibuat dengan mendispersi serbuk SiO₂ (2 g) yang telah di gerus dalam *aquadest*. Larutan PVA (0,5 %) dibuat dengan melarutkan PVA (2 g) dengan pelarut metanol 50 %. Suspensi SiO₂ *distirrer* selama 24 jam kemudian di homogenisasi dengan ultrasonik selama 4 jam. Larutan PVA kemudian *distirrer* selama 4 jam pada suhu 125 °C kemudian dihomogenisasi dengan ultrasonik selama 4 jam (Urbina *et al.*, 2018)

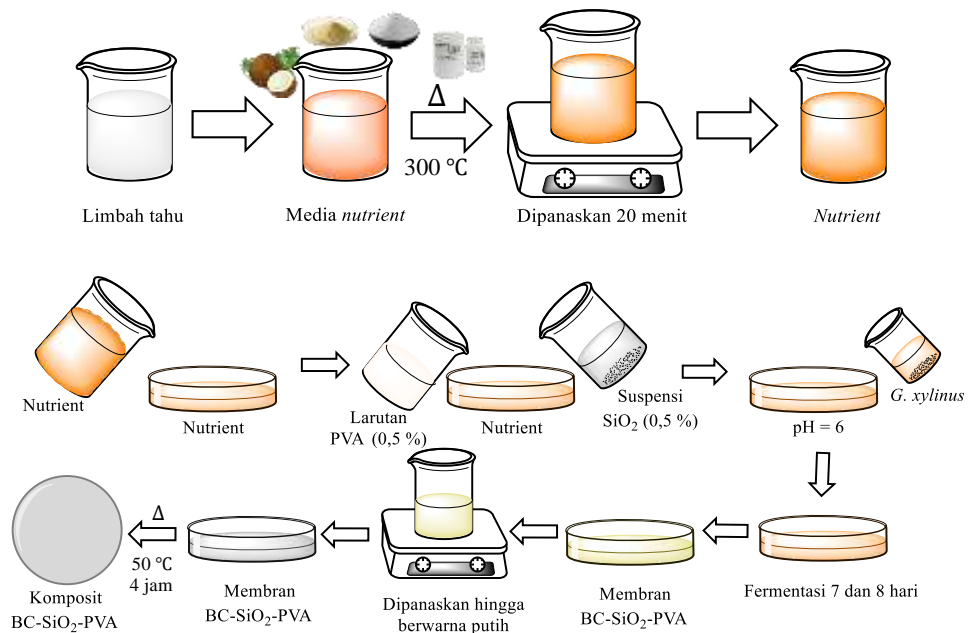
Pembuatan komposit BC-SiO₂-PVA

Komposit BC-SiO₂-PVA secara *in-situ* diperoleh dengan menambahkan suspensi SiO₂ dan larutan PVA ke dalam *nutrient* BC. Prosedur pembuatan *nutrient* BC dilakukan dengan proses yang sama

seperti pembuatan *starter* bakteri berdasarkan penelitian Syamsu & Kuryani (2014). Media BC dimasukkan ke dalam cawan petri dengan perbandingan yang disajikan pada Tabel 1, kemudian ditambahkan suspensi SiO₂ (0,5 %) dan larutan PVA (0,5 %) dengan perbandingan yang sama. Variasi ini menunjukkan pengujian komposit dengan variasi penambahan volume *nutrient*, SiO₂ (0,5 %) dan larutan PVA (0,5 %). Masing masing larutan diaduk merata kemudian ditambahkan bakteri *G. xylinus* pada rentang pH 5 - 6 sebanyak 10 % (v/v). Larutan kemudian ditutup dengan kertas coklat dan difermentasi selama 7 hari untuk variasi penambahan volume *nutrient* serta 7 dan 8 hari untuk variasi penambahan volume SiO₂ (0,5 %) dan PVA (0,5 %). Lembaran BC-SiO₂-PVA dimurnikan dengan dibersihkan dan dipanaskan hingga berwarna putih dan direndam dalam larutan NaOH 0,5 M. Lembaran BC-SiO₂-PVA melalui proses pemurnian dan pengeringan yang sama seperti membran BC.

Tabel 1. Perbandingan volume BC-SiO₂-PVA

Perbandingan volume								
Nutrient (mL)			Silika (mL)			PVA (mL)		
Nutrient	SiO ₂	PVA	Nutrient	SiO ₂	PVA	Nutrient	SiO ₂	PVA
2	1	1	4	0,5	1	4	1	1
4	1	1	4	1	1	4	1	2
6	1	1	4	1,5	1	4	1	3
8	1	1				4	1	4



Gambar 1. Prosedur pembuatan komposit BC-SiO₂-PVA

Karakterisasi kimia komposit BC-SiO₂-PVA dilakukan dengan pengujian FTIR, karakterisasi fisik komposit BC-SiO₂-PVA dilakukan dengan pengujian ketebalan, porositas, elektrolit, konduktivitas, dan uji mekanik yang meliputi kuat tarik, elongasi dan *modulus young*. Uji ketebalan dilakukan dengan mengambil rata-rata titik ketebalan sampel (Satriady et al., 2016).

Porositas dilakukan dengan merendam sampel dalam *n*-butanol 80 % (v/v) dan dihitung berdasarkan persamaan :
$$\phi = \frac{(Mb - Mk)}{\rho_B \times V_k} \times 100 \%$$
 (Xu et al., 2019). Dimana Mb = massa basah, Mk = massa kering, ρ_B = massa jenis *n*-butanol, V_k = volume kering sampel. Elektrolit dihitung dengan merendam sampel dalam larutan NaOH selama 1 jam kemudian dihitung berdasarkan

$$\text{persamaan : } Ae = \frac{Mb - Mk}{Mk} \times 100 \%$$

(Pahlevi et al., 2020, Xu et al., 2019).

Pengujian konduktivitas dilakukan dengan mengalirkan arus listrik pada ujung sampel dengan persamaan : $k =$

$$\frac{1}{\rho} \text{ dimana : } \rho = \frac{V \times l \times t}{I \times L} \text{ (Firdaus et al.,}$$

2020; Li et al., 2012). Dimana V = tegangan listrik (V), l = lebar sampel (cm), t = tebal sampel (mm), I = kuat arus listrik (A), L = panjang sampel (cm). Uji mekanik komposit BC-SiO₂-PVA dilakukan dengan ASTM D638 dengan tensilon RTG-1310 pada kapasitas *load cell* 5,0 kN menggunakan kecepatan simpangan penarikan sampel 5 mm / menit (Kumar & Narayan, 2019). Analisis morfologi komposit BC-SiO₂-PVA dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Selulosa Bakteri

Selulosa bakteri (BC) disintesis pada kondisi (7 & 8 hari) pada suhu (25 – 30 °C), pH 6 dengan bantuan bakteri *G. xylinus* pada media limbah cair tahu. Visualisasi BC berwarna putih dan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. visualisasi BC

Peningkatan nilai ketebalan BC dipengaruhi oleh lamanya waktu fermentasi, dimana semakin lama waktu fermentasi maka terjadi peningkatan pembentukan polimerisasi selulosa yang mengakibatkan rantai polimer semakin panjang. Hal ini mengakibatkan BC menjadi lebih tebal dan memiliki kandungan air yang tinggi (Galdino et al., 2020).

Tabel 1. Hasil uji fisik BC

Uji	Waktu Fermentasi (Hari)		
	6	7	8
t	13 ^[1]	18	28
ϕ	76,12 ^[2]	417,402	59,91
Ae	35,15 ^[3,4]	471,202	246,52
k	0,4 ^[5]	0,825	2,5

Keterangan : [1] Galdino et al. (2020); [2] Hartini et al. (2018); [3] Rahadi et al. (2020); [4] Yasa et al. (2020); [5] Shah & Brown. (2005)

Peningkatan nilai porositas dipengaruhi oleh massa yang dapat diserap oleh BC dan tebal, dimana porositas berbanding terbalik dengan

tebal. Peningkatan porositas berbanding lurus dengan elektrolit dan konduktivitas (Firdaus *et al.*, 2022; Iqbal *et al.*, 2022). Peningkatan elektrolit dan konduktivitas dipengaruhi oleh pori-pori komposit yang terbentuk, tingginya pori maka memudahkan terjadinya serapan elektrolit dan transfer ion.

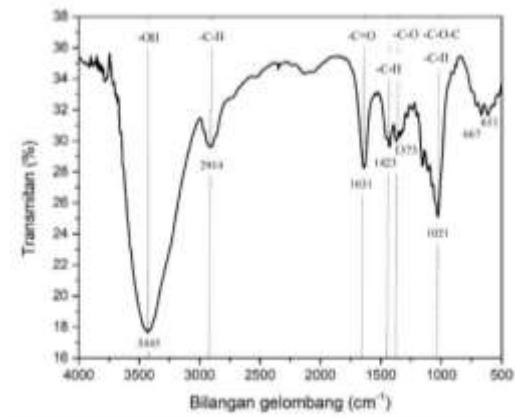
Karakteristik mekanik BC meliputi uji kuat tarik, *modulus young* dan elongasi. Hasil uji mekanik BC disajikan pada Gambar 3. Hasil uji kuat tarik berbanding terbalik dengan nilai porositas (Tanpichai *et al.*, 2019). Peningkatan kuat tarik dipengaruhi karena semakin panjang rantai polimer maka ikatan hidrogen antarmolekul akan semakin tinggi dan komposit akan semakin kuat. Nilai kuat tarik berbanding lurus dengan *modulus young* dan berbanding terbalik dengan elongasi (Firdaus *et al.*, 2022; Iqbal *et al.*, 2022; Rahadi *et al.*, 2020).

Tabel 2. Hasil uji mekanik BC

Uji	Waktu Fermentasi		
	6	7	8
σ	32,24	114,12	166,08
Elo	15,0	1,79	3,22
Modu	2,13	5813,20	4989,60

Keterangan : [1] Galdino *et al.* (2020).

Selulosa bakteri diuji menggunakan spektroskopi FTIR untuk melihat pita serapan yang terbentuk pada BC. Hasil Spektrum FTIR disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil FTIR BC

Berdasarkan hasil spektrum FTIR BC menunjukkan terdapat puncak serapan gugus -OH yang mengalami vibrasi ulur pada bilangan gelombang 3445 cm^{-1} . Regang C-H pada CH_2 dan CH_3 dari polisakarida ditunjukkan oleh pita serapan pada bilangan gelombang 2914 cm^{-1} dan diikuti lentur C-H pada bilangan gelombang 1429 cm^{-1} yang menunjukkan cincin siklik lingkaran enam dari monomer glukosa (piran). Pita serapan gugus -C-O-C dengan vibrasi ulur pada bilangan gelombang 1021 cm^{-1} menunjukkan adanya ikatan glikosida yang membentuk ikatan antarmolekul polisakarida dan ikatan

-CO pada cincin selulosa. Hasil FTIR BC disajikan pada Tabel 3.

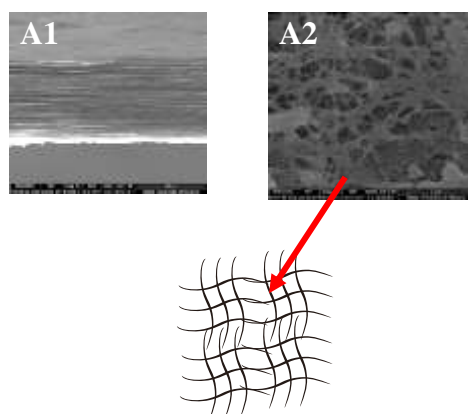
Tabel 3. Spektrum FTIR BC

Pita Serapan	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)	
	Hasil Penelitian	Referensi
-OH	3445	3425 ^[1] , 3388 ^[2] , 3300 ^[3]
-C-H regangan dari CH ₂ dan CH ₃	2914	2900 ^[1,2] , 2820 ^[3] 1650 ^[1]
-C-H cincin piranosa	1429	1365 ^[1] , 1340 ^[2]
C-O-C	1021	1061 ^[1] 1163 ^[4]

Keterangan : [1] Sukarta, (2020) [2] Hartini *et al.* (2018); [3] Zhijiang & Guang. (2011); [4] Jia *et al.* (2016).

Karakterisasi Morfologi BC

Karakteristik morfologi BC Morfologi permukaan BC disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Citra SEM A1) penampang melintang BC (5000 ×); A2) BC (50000 ×)

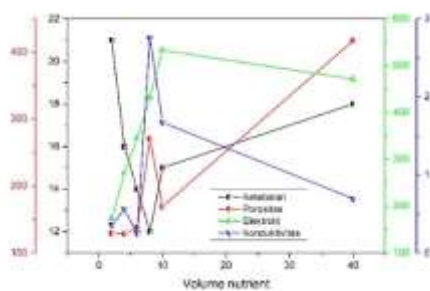
Morfologi permukaan BC disajikan pada Gambar 4. A1 memperlihatkan penampang melintang BC dimana pembentukan polimer selulosa yang disintesis secara *in-situ* tersusun secara rapi dan berlapis. Pada Gambar 4. A2 menunjukkan citra SEM BC yang memperlihatkan serat berongga membentuk 3D yang saling berikatan sehingga menyebabkan BC memiliki sifat yang baik dalam menyerap air (Galdino *et al.*, 2020; He *et al.*, 2021h; Wahid *et al.*, 2021) dan dispersi serat yang tinggi karena adanya jaringan yang acak dan seragam (Costa *et al.*, 2017).

Karakteristik Komposit BC-SiO₂-PVA

Komposit BC-SiO₂-PVA disintesis pada kondisi (7 & 8 hari), suhu (25 – 30 °C), pH 6, dengan bantuan bakteri *G. xylinus* dan penambahan *filler* SiO₂ (0,5 %) dan PVA (0,5 %) menggunakan media limbah cair tahu dengan metode *in-situ*. Komposit BC-SiO₂-PVA memiliki visualisasi yang sama dengan BC yakni berwarna putih transparan.

1. Variasi perbandingan *nutrient*

Uji fisik komposit BC-SiO₂-PVA disajikan pada Gambar 5. Hasil uji ketebalan komposit BC-SiO₂-PVA mengalami penurunan seiring dengan penambahan volume *nutrient*. Hal ini dikarenakan semakin banyak *nutrient* maka rantai polimer selulosa yang dihasilkan akan semakin panjang, dan kandungan air yang dilepaskan semakin tinggi (Galdino *et al.*, 2020). Tingginya kandungan air memungkinkan terganggunya interaksi antara selulosa, SiO₂ dan PVA yang mempengaruhi ketebalan komposit.

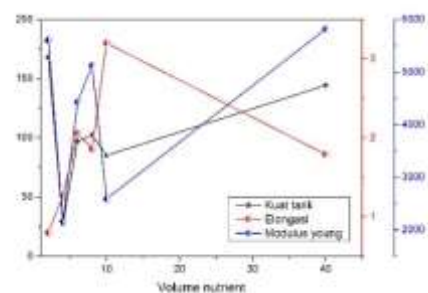


Gambar 5. Hasil uji fisik komposit BC-SiO₂-PVA variasi *nutrient*

Ketebalan komposit berpengaruh pada nilai porositas, elektrolit dan konduktivitas. Nilai porositas mengalami peningkatan seiring dengan penurunan nilai ketebalan, hal ini sesuai dengan persamaan pengujian porositas.

Proses homogenisasi dengan ultrasonikasi memecah partikel *filler* sehingga mudah terdispersi dengan serat BC (Li *et al.*, 2012). Nilai porositas berbanding lurus dengan elektrolit dan konduktivitas (Firdaus *et al.*, 2022; Iqbal *et al.*, 2022). Peningkatan porositas mempengaruhi pori komposit yang dihasilkan, semakin rapatnya pori maka akan memudahkan transfer ion dan serapan elektrolit.

Hasil uji mekanik komposit BC-SiO₂-PVA variasi perbandingan *nutrient* meliputi uji kuat tarik, *modulus young* dan elongasi. Komposit BC-SiO₂-PVA variasi perbandingan *nutrient* disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hasil uji mekanik komposit BC-SiO₂-PVA variasi *nutrient*

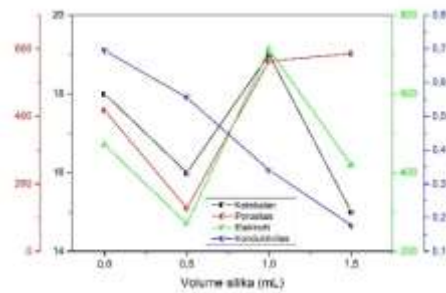
Hasil uji kuat tarik komposit BC-SiO₂-PVA variasi perbandingan *nutrient* mengalami peningkatan seiring penambahan

volume *nutrient*. Berdasarkan penelitian Tanpichai *et al.*, (2019) nilai kuat tarik berbanding terbalik dengan nilai porositas dan ketebalan. Peningkatan *nutrient* menyebabkan rantai polimer semakin panjang dan meningkatkan ketebalan komposit sehingga semakin tebal komposit yang dihasilkan nilai kuat tariknya semakin kecil. Nilai kuat tarik berbanding lurus dengan *modulus young* dan berbanding terbalik dengan elongasi.

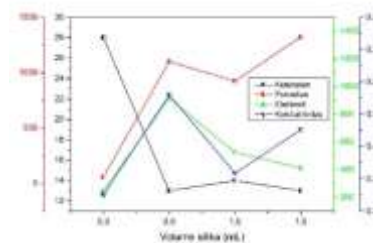
2. Variasi Perbandingan Silika

Komposit BC-SiO₂-PVA pada uji ketebalan menunjukkan penurunan seiring dengan penambahan SiO₂ dan lamanya waktu fermentasi. Hal ini dikarenakan semakin semakin panjangnya rantai polimer dan molekul air yang dihasilkan (Galdino *et al.*, 2020). Penambahan SiO₂ mampu mengganggu ikatan antara SiO₂ dan selulosa yang menyebabkan terjadinya penurunan ketebalan (Yano *et al.*, 2008). Peningkatan rantai polimer akan mempengaruhi massa serapan komposit, dimana massa serapan

yang tinggi dengan nilai ketebalan yang hampir sama memiliki porositas yang tinggi. Peningkatan nilai porositas juga dipengaruhi oleh adanya homogenisasi dengan ultrasonikasi selama proses pembuatan suspensi SiO₂ dan larutan PVA (Li *et al.*, 2012). Nilai porositas berbanding lurus dengan elektrolit dan konduktivitas (Firdaues *et al.*, 2022; Iqbal *et al.*, 2022). Peningkatan porositas menyebabkan pori-pori komposit semakin rapat yang memudahkan dalam transfer ion dan meningkatkan serapan elektrolit.

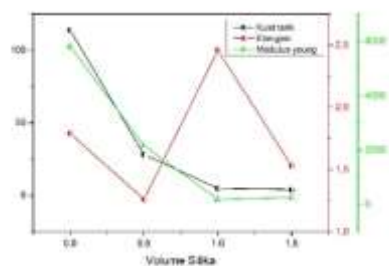


Gambar 7. Karakterisasi fisik komposit variasi silika waktu fermentasi 7 hari

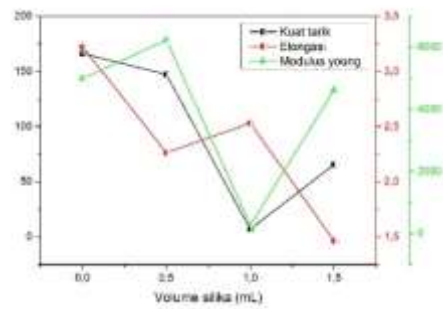


Gambar 8. Karakterisasi fisik komposit variasi silika waktu fermentasi 8 hari

Hasil uji kuat tarik komposit BC-SiO₂-PVA variasi penambahan SiO₂ (0,5 %) menunjukkan penurunan seiring dengan penambahan SiO₂ dan lamanya waktu fermentasi. Hal ini disebabkan oleh semakin panjangnya rantai polimer yang terbentuk dan molekul air yang dihasilkan selama proses polimerisasi selulosa, Nilai ketebalan komposit berbanding terbalik dengan kuat tarik, dimana diperoleh pada data komposit dengan ketebalan tertinggi memiliki nilai kuat tarik yang rendah dan porositas yang rendah (Tanpichai *et al.*, 2019). Nilai kuat tarik berbanding lurus dengan *modulus young* dan berbanding terbalik dengan elongasi (Firdaus *et al.*, 2022; Iqbal *et al.*, 2022).



Gambar 9. Karakteristik mekanik komposit variasi silika waktu fermentasi 7 hari

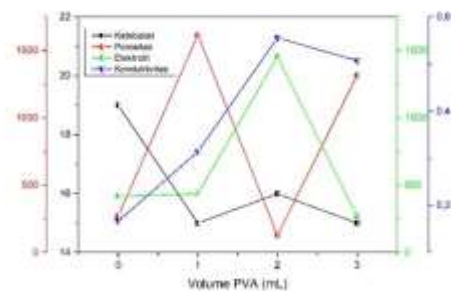


Gambar 10. Karakteristik mekanik komposit variasi silika waktu fermentasi 7 hari

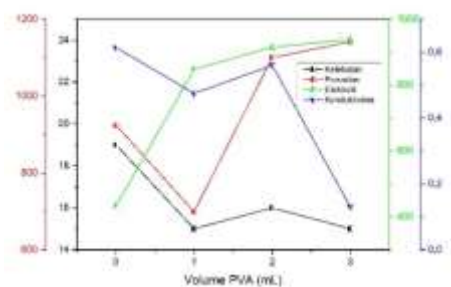
3. Variasi Perbandingan PVA

Hasil uji ketebalan komposit BC-SiO₂-PVA variasi penambahan PVA menunjukkan penurunan seiring dengan penambahan volume PVA (0,5 %) dan lamanya waktu fermentasi. Peningkatan porositas dipengaruhi oleh panjangnya rantai polimer selulosa yang terbentuk serta proses homogenisasi dengan ultrasonikasi yang membantu memecah partikel SiO₂ dan PVA sehingga mudah terdispersi dengan serat selulosa (Galdino *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2012). Porositas dipengaruhi oleh massa yang diserap serta ketebalan dimana semakin tinggi massa maka nilai porositas akan semakin tinggi. Nilai porositas berbanding lurus dengan nilai elektrolit dan konduktivitas (Firdaus *et al.*, 2022;

Iqbal *et al.*, 2022). Porositas dipengaruhi oleh pori-pori komposit sehingga semakin rapat pori maka semakin mudah dalam transfer ion dan meningkatkan serapan elektrolit. Komposit BC-SiO₂-PVA perbandingan PVA memiliki nilai konduktivitas kecil dikarenakan PVA bersifat isolator sehingga sulit untuk mengantarkan arus listrik (Sharma *et al.*, 2021).



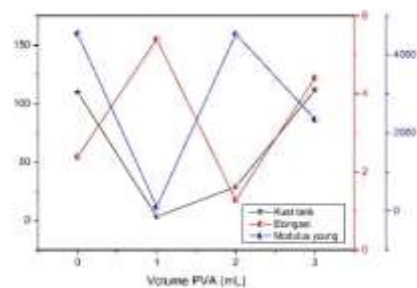
Gambar 11. Karakterisasi fisik komposit variasi PVA waktu fermentasi 7 hari



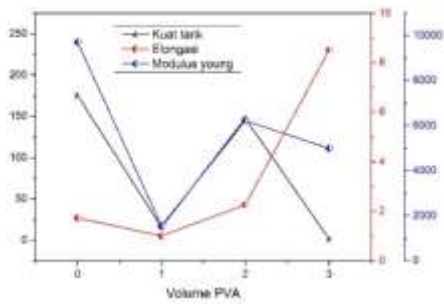
Gambar 12. Karakterisasi fisik komposit variasi PVA waktu fermentasi 8 hari

Karakteristik mekanik komposit BC-SiO₂-PVA variasi penambahan PVA (0,5 %)

dilakukan melalui uji kuat tarik, *modulus young* dan elongasi. Komposit BC-SiO₂-PVA variasi penambahan PVA (0,5 %) disajikan dalam Tabel 4.9. Karakteristik mekanik komposit BC-SiO₂-PVA variasi perbandingan PVA menunjukkan nilai kuat tarik berbanding terbalik dengan ketebalan dan porositas (Tanpichai *et al.*, 2019). Penambahan *filler* PVA meningkatkan nilai kuat tarik komposit BC-SiO₂-PVA dikarenakan adanya ikatan hidrogen yang tinggi antara BC dan PVA (Piluharto *et al.*, 2018; Sonker *et al.*, 2019; Qiao *et al.*, 2015) serta dikarenakan persebaran PVA pada BC yang seragam (Wang *et al.*, 2022). Nilai kuat tarik berbanding lurus dengan nilai *modulus young* dan berbanding terbalik dengan nilai elongasi (Firdaus *et al.*, 2022; Iqbal *et al.*, 2022).



Gambar 13. Karakterisasi mekanik komposit variasi PVA waktu fermentasi 7 hari

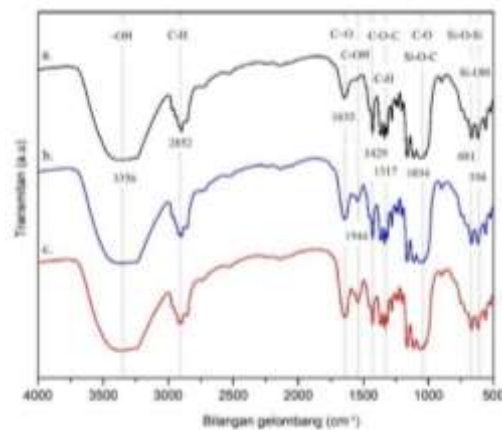


Gambar 14. Karakterisasi mekanik komposit PVA waktu fermentasi 8 hari

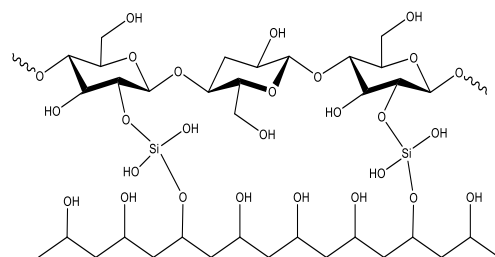
Karakterisasi Kimia Komposit BC-SiO₂-PVA

Berdasarkan hasil data spektrum FTIR komposit BC-SiO₂-PVA diperoleh adanya pita serapan -OH yang mengalami pelebaran pada bilangan gelombang dengan *range* 3000 – 3500 cm⁻¹. Hal ini menunjukkan adanya penggabungan pita serapan pada gugus hidroksil (-OH) dari selulosa, SiO₂ dan PVA (Warastuti *et al.*, 2015). Vibrasi ulur C-H (asimetris), gugus karbonil (C=O) serta peregangan pada C-O-C terlihat pada bilangan gelombang 2852, 1633, dan 1317 cm⁻¹ yang menunjukkan adanya PVA dan polisakarida pada komposit BC-SiO₂-PVA. Pita serapan

Si-O-C yang membentuk ikatan kovalen antara selulosa dengan SiO₂ terdapat pada bilangan gelombang 1034 cm⁻¹. Vibrasi Si-O-Si dan Si-OH pada bilangan gelombang 681 dan 556 cm⁻¹ yang menunjukkan adanya SiO₂ yang terikat pada komposit BC-SiO₂-PVA.



Gambar 15. Hasil FTIR komposit a) BC-SiO₂-PVA; b) BC-SiO₂; c) BC-PVA.



Gambar 16. Prediksi reaksi kimia dari selulosa bakteri, silika dan PVA.

Tabel 4. Hasil FTIR Komposit BC-SiO₂-PVA

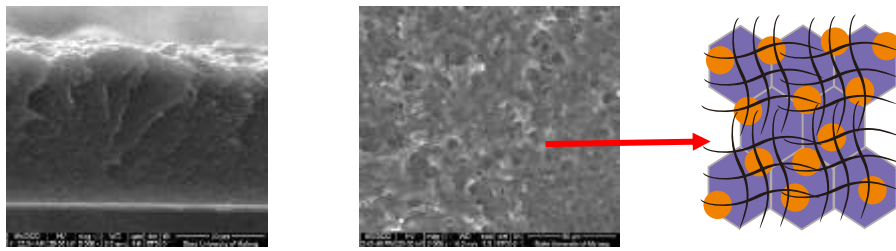
Pita Serapan	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)	
	Hasil Penelitian	Referensi
-OH	3356	3425 ^[1] , 3335 ^[2,4] , 3413 ^[3] , 3366 ^[5] , 3392 ^[6]
-CH	2852	2900 ^[1,3,5] , 2922 ^[2] , 2870 ^[4] , 2902 ^[6]
-C=O	1633	1635 ^[1] , 1639 ^[2] , 1632 ^[3] , 1731 ^[5] , 1700 ^[6]
-C-O-C dan C-H	1317	1365 ^[1] , 1330 ^[2] , 1314 ^[4]
Si-O-C	1034	1038 ^[1] , 1061 ^[1] , 1064 ^[3] , 1080 ^[5] , 833 ^[6]
Si-O-Si	681	895 ^[3] , 799 ^[4]
Si-OH	556	815 ^[3]

Keterangan : [1] Sukarta. (2020); [2] Hartini *et al.* (2018); [3] Shi *et al.* (2013); [4] Wang *et al.* (2022); [5] Sankarganesh *et al.* (2022); [6] Sharma *et al.* (2021).

Karakteristik Morfologi Komposit BC-SiO₂-PVA

Morfologi permukaan komposit BC-SiO₂-PVA disajikan pada Gambar 17. Pada Gambar 17. B1 memperlihatkan penampang melintang komposit BC-SiO₂-PVA yang disintesis dengan metode *in-situ* dimana lapisan pada BC yang rapi mulai mengalami pelebaran. Hal ini dikarenakan penambahan *filler* dan proses homogenisasi dengan menggunakan ultrasonikasi pada proses pembuatan suspensi SiO₂ dan larutan PVA (Li *et al.*, 2012). Pada Gambar 17. B2 menunjukkan citra SEM komposit BC-SiO₂-PVA yang menandakan rongga-rongga pada BC

telah tertutup secara acak dan tidak merata oleh penambahan *filler* SiO₂ dan PVA. *Filler* SiO₂ berbentuk fibril 3D yang tersusun merata dan bertumpuk dengan bentuk pori-pori udara yang besar (Castro *et al.*, 2012; Kaya & Deveci., 2020; Yu *et al.*, 2020; Deka *et al.*, 2019), yang menghasilkan ukuran selulosa menjadi lebih tebal dengan bentuk seragam sehingga mampu meningkatkan agregasi partikel (Wang *et al.*, 2022). *Filler* PVA memiliki bentuk berongga yang kemudian setelah berikatan dengan selulosa dan SiO₂ mengalami pelebaran dan membentuk lapisan komposit secara acak (Qiao *et al.*, 2015).



Gambar 17. Citra SEM B1) penampang melintang komposit BC-SiO₂-PVA (5000 ×); B2) komposit BC-SiO₂-PVA (10000 ×)

Kesimpulan

Berdasarkan data dan hasil pembahasan dalam penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- Komposit SiO₂-PVA berbasis BC limbah cair tahu berhasil disintesis dengan metode *in-situ* dengan variasi penambahan volume *nutrient*, volume SiO₂ (0,5 %) dan volume PVA (0,5 %).
- Penambahan *nutrient*, SiO₂ dan PVA dalam BC melalui metode *in-situ* dapat meningkatkan sifat fisik dan mekanik komposit BC-SiO₂-PVA sehingga dapat meningkatkan potensi komposit dalam berbagai bidang aplikasi.

Saran

Berdasarkan data yang diperoleh BC dan komposit BC-SiO₂-PVA dapat

dikembangkan sebagai aplikasi di bidang industri sebagai separator baterai, *food packaging* serta membran filtrasi.

Daftar Pustaka

- Adam, F., Chew, T. S., & Andas, J. (2011). A simple template-free sol-gel synthesis of spherical nanosilica from agricultural biomass. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 59(3), 580–583. <https://doi.org/10.1007/s10971-011-2531-7>
- Afrizal, & Purwanto, A. (2011). Pemanfaatan selulosa bakterial nata de coco sebagai adsorban logam Cu(II) dalam sistem berpelarut air. *JRSKT - Jurnal Riset Sains Dan Kimia Terapan*, 1(1), 27. <https://doi.org/10.21009/jrskt.011.05>
- Al-Arjan, W, S., Khan, M, U, A., Almutairi, H, H., Alharbi, S, M., Razak, S, I,A. (2022). pH-Responsive PVA/BC-f-GO Dressing Materials for Burn and Chronic Wound Healing with

- Curcumin Release Kinetics. *Polymers*, 14(1949), 2-16. <https://doi.org/10.3390/polym14101949>
- Alwi, M. (2008). Pemanfaatan limbah fermentasi biji kakao (*Theobroma cacao* L) untuk produksi nata. *Jurnal Biocelebes*, 2(1).
- Alwi, M., Rahmiati, & Umrah. (2011). Pemanfaatan Limbah Cair Tahu (Whey Tahu) Sebagai Media Tumbuh *Acetobacter xylinum* untuk Memproduksi Nata. *Jurnal Biocelebes*, 5(2), 1978–6417.
- Amorim, L. F. A., Mouro, C., Riool, M., & Gouveia, I. C. (2022). Antimicrobial food packaging based on prodigiosin-incorporated double-layered bacterial cellulose and chitosan composites. *Polymers*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/polym14020315>
- Ashori, A., Sheykhnazari, S., Tabarsa, T., Shakeri, A., & Golalipour, M. (2012). Bacterial cellulose / silica nanocomposites: preparation and characterization. *Carbohydrate Polymers*, 90(1), 413–418.
- Badshah, M., Ullah, H., Khan, A. R., Khan, S., Park, J. K., & Khan, T. (2018). Surface modification and evaluation of bacterial cellulose for drug delivery. *International Journal of Biological Macromolecules*, 113, 526–533. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.02.135>
- Cahyana, A., & Marzuki, A. (2014). Analisa SEM (Scanning Electron Microscope) pada kaca TZN yang dikristalkan sebagian. *Prosiding Mathematics and Sciences Forum 2014*, 23–26.
- Callister, J. D. W., & Retwitsch, D. G. (2018). *Material science and engineering - an introduction 10th edition*.
- Cai, J., Liu, S., Feng, J., Kimura, S., Wada, M., Kuga, S., & Zhang, L. (2012). Cellulose-silica nanocomposite aerogels by in-situ formation of silica in cellulose gel. *Angewandte Chemie*, 124(9), 2118–2121. <https://doi.org/10.1002/ange.201105730>
- Castro, C., Zuluaga, R., Putaux, J. L., Caro, G., Mondragon, I., & Gañán, P. (2011). Structural characterization of bacterial cellulose produced by *Gluconacetobacter swingsii* sp. from Colombian agroindustrial wastes. *Carbohydrate Polymers*, 84(1), 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.10.072>
- Costa, A. F. S., Almeida, F. C. G., Vinhas, G. M., & Sarubbo, L. A. (2017). Production of bacterial cellulose by *Gluconacetobacter hansenii* using corn steep liquor as nutrient sources. *Frontiers in Microbiology*, 8(OCT), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02027>
- Costa, C. M., Lee, Y. H., Kim, J. H., Lee, S. Y., & Lanceros-Méndez, S. (2019). Recent advances on separator membranes for lithium-ion battery applications: From porous membranes to solid electrolytes. *Energy Storage Materials*, 22(July), 346–375. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.07.024>

- Deka, B. J., Lee, E. J., Guo, J., Kharraz, J., & An, A. K. (2019). Electrospun nanofiber membranes incorporating PDMS-aerogel superhydrophobic coating with enhanced flux and improved antiwettability in membrane distillation. *Environmental Science and Technology*, 53(9), 4948–4958. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b07254>
- Dewi, P. P. I. P., & Permatasari, A. A. P. (2020). Karakterisasi membran kombinasi nata de coco dan leri dalam aplikasi desalinasi larutan NaCl berbasis elektrodialisis. *Siniesia Prosiding*, 1(November), 221–228.
- Esa, F., Tasirin, S. M., & Rahman, N. A. (2014). Overview of bacterial cellulose production and application. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2014.11.017>
- Fan, M., Dai, D., & Huang, B. (2012). Fourier transform infrared spectroscopy for natural fibres. *Fourier Transform - Materials Analysis*, May 2012. <https://doi.org/10.5772/35482>
- Fauza, A. N., Mardiyati, & Steven. (2019). Pembuatan dan karakterisasi separator baterai berbahan selulosa alga cladophora. *Jurnal Teknologi Bahan Dan Barang Teknik*, 9(2), 69. <https://doi.org/10.37209/jtbbt.v9i2.135>
- Firdaus, I., Sembiring, S., Junaidi, Johandra, A., Rifansyah, T. I., Rahmadi, R. P., & Putra, O. A. (2022). Sintesis dan karakterisasi nanofiber TiO₂ menggunakan electrospinning. *Indonesian Journal of Applied Physics (IJAP)*, 12(1), 116–123.
- Galdino, C. J. S., Maia, A. D., Meira, H. M., Souza, T. C., Amorim, J. D. P., Almeida, F. C. G., Costa, A. F. S., & Sarubbo, L. A. (2020). Use of a bacterial cellulose filter for the removal of oil from wastewater. *Process Biochemistry*, 91(December), 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.12.020>
- Gea, S., Bilotti, E., Reynolds, C. T., Soykeabkeaw, N., & Peijs, T. (2010). Bacterial cellulose-poly(vinyl alcohol) nanocomposites prepared by an in-situ process. *Materials Letters*, 64(8), 901–904. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.01.042>
- Gea, S., Torres, F. G., Troncoso, O. P., Reynolds, C. T., Vilasecca, F., Iguchi, M., & Peijs, T. (2007). Biocomposites based on bacterial cellulose and apple and radish pulp. *International Polymer Processing*, 22(5), 497–501. <https://doi.org/10.3139/217.2059>
- Gomes, F. P., Silva, N. H. C. S., Trovatti, E., Serafim, L. S., Duarte, M. F., Silvestre, A. J. D., Neto, C. P., & Freire, C. S. R. (2013). Production of bacterial cellulose by *Gluconacetobacter sacchari* using dry olive mill residue. *Biomass and Bioenergy*, 55, 205–211. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.02.004>

- Gonzalez, J. S., Ludueña, L. N., Ponce, A., & Alvarez, V. A. (2014). Poly(vinyl alcohol)/cellulose nanowhiskers nanocomposite hydrogels for potential wound dressings. *Materials Science and Engineering C*, 34(1), 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2013.10.006>
- Hamad, A., Hidayah, B. I., Solekhah, A., & Septhea, A. G. (2017). Potensi kulit nanas sebagai substrat dalam pembuatan nata de pina. *Jurnal Riset Sains Dan Teknologi*, 1(1), 9–14.
- Hartini, A. S., Syahbanu, I., & Nurlina. (2018). Uji water uptake dan porositas terhadap blend membran berbasis polisulfon dan selulosa asetat dari nata de coco. *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 7(4), 25–30.
- He, N., Li, L., Chen, J., Zhang, J., & Liang, C. (2021). Extraordinary superhydrophobic polycaprolactone-based composite membrane with an alternated micro-nano hierarchical structure as an eco-friendly oil/water separator. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 13(20), 24117–24129. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c03019>.
- Henning, S., & Svensson, L. (2008). Production of silica aerogel. *Journal of Nanocrystallin Solids*, 23, 697.
- Hidayati, S., Zulferiyenni, & Satyajaya, W. (2019). Optimasi pembuatan biodegradable film dari selulosa limbah padat rumput laut *Eucaema cottonii* dengan penambahan gliserol, kitosan, CMC dan tapioka. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia (JPHPI)*, 22(2), 340–354.
- Huang, Y., Zheng, Y., Song, W., Ma, Y., Wu, J., Fan, L. (2011). Poly(vinil pyrrolidone) wrapped multi-walled carbon nanotube/poly(vinyl alcohol) composite hydrogels. *Composite Part A*, 42(2011), 1398-1405.
- Hodel, K. V. S., Machado, B. A. S., Sacramento, G. da C., Maciel, C. A. de O., Oliveira-Junior, G. S., Matos, B. N., Gelfuso, G. M., Nunes, S. B., Barbosa, J. D. V., & Godoy, A. L. P. C. (2022). Active potential of bacterial cellulose-based wound dressing analysis of its potential for dermal lesion treatment. *Pharmaceutics*, 14(1222), 1–31. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14061222>
- Iqbal, M., Yuniarti, E., Amran, A., & Putra, A. (2022). Karakterisasi komposit selulosa bakteri – ekstrak daun kacapiring (*Gardenia Jassminoides J. Ellis*) dengan penambahan crosslinker. *Periodic*, 11(1), 84–91.
- Iskandar, Zaki, M., Sri Mulyati, U. F., Sari, I., & Juchairawati. (2010). Pembuatan film selulosa dari nata de pina. *Jurnal Rekayasa Kimia Dan Lingkungan*, 7(3), 105–111.
- Jabeen, N., Majid, I., & Nayik, G. A. (2015). Bioplastics and food packaging: A review. *Cogent Food and Agriculture*, 1(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1117749>
- Jaya, J. D., Ariyani, L., & Hadijah, H.

- (2019). Designing clean production of tofu processing industry in Ud. Sumber Urip Pelaihari. *Jurnal Agroindustri*, 8(2), 105–112. <https://doi.org/10.31186/j.agroind.8.2.105-112>
- Jayaraj, S., Vellaichamy, P., Sehar, M., Ramasamy, A., Ponnusamy, S. K., & Daramola, M. O. (2020). Enhancement in thermal, mechanical and electrical properties of novel PVA nanocomposite embedded with SrO nanofillers and the analysis of its thermal degradation behavior by nonisothermal approach. *Polymer Composites*, 41(4), 1277–1290. <https://doi.org/10.1002/pc.25453>
- Jia, Y., Zhai, X., Fu, W., Liu, Y., Li, F., & Zhong, C. (2016). Surfactant-free emulsions stabilized by tempo-oxidized bacterial cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 151, 907–915. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.099>
- Jiang, J., Zhang, Q., Zhan, X., & Chen, F. (2017). Renewable, Biomass-Derived, Honeycomblike Aerogel As a Robust Oil Absorbent with Two-Way Reusability. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 5(11), 10307–10316. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02333>
- Julian, J., & Santoso, E. (2016). Pengaruh komposisi PVA kitosan terhadap perilaku membran komposit PVA/kitosan/grafin oksida yang terikat silang asam sulfat. *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, 5(1), 37–43.
- Kaya, G. G., & Deveci, H. (2020). Synergistic effects of silica aerogels/xerogels on properties of polymer composites: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 89, 13–27. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.05.019>
- Keshk, S. M. (2014). Bacterial cellulose production and its industrial applications. *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, 04(02). <https://doi.org/10.4172/2155-9821.1000150>
- Kim, J., Cai, Z., Lee, H. S., Choi, G. S., Lee, D. H., & Jo, C. (2011). Preparation and characterization of a bacterial cellulose/chitosan composite for potential biomedical application. *Journal of Polymer Research*, 18(4), 739–744. <https://doi.org/10.1007/s10965-010-9470-9>
- Kumar, S. A., & Narayan, Y. S. (2019). Tensile testing and evaluation of 3D-printed PLA specimens as per ASTM D638 type IV standard. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (Issue January 2019). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2718-6_9
- Li, W., Yue, J., & Liu, S. (2012). Preparation of nanocrystalline cellulose via ultrasound and its reinforcement capability for poly(vinyl alcohol) composites. *Ultrasonics Sonochemistry*, 19(3), 479–485. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2011.11.007>

- Lv, W., Mei, Q., Xiao, J., Du, M., & Zheng, Q. (2017). 3D multiscale superhydrophilic sponges with delicately designed pore size for ultrafast oil/water separation. *Advanced Functional Materials*, 27(48), 1–9. <https://doi.org/10.1002/adfm.201704293>
- Maeda, H., Nakajima, M., Hagiwara, T., Sawaguchi, T., & Yano, S. (2006). Bacterial cellulose/silica hybrid fabricated by mimicking biocomposites. *Journal of Materials Science*, 41(17), 5646–5656. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0297-z>.
- Mahardhika, M. K., & Muldarisnur. (2021). Sintesis dan karakterisasi silika aerogel sebagai absorben tumpahan minyak. *Jurnal Fisika Unand (JFU)*, 10(3), 296–302. <https://doi.org/10.25077/jfu.10.3.296-302.2021>.
- Mansur, H. S., Sadahira, C. M., Souza, A. N., & Mansur, A. A. P. (2008). FTIR spectroscopy characterization of poly (vinyl alcohol) hydrogel with different hydrolysis degree and chemically crosslinked with glutaraldehyde. *Materials Science and Engineering C*, 28(4), 539–548. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2007.10.088>.
- Millon, L. E., & Wan, W. K. (2006). The polyvinly alcohol-bacterial cellulose system as a new nanocomposite for biomedical applications. *Journal of Biomedical Material Research-Part A Applied Biomaterials*, 79(2), 245-253.
- Nisa, F. C. (2002). Penurunan tingkat pencemaran limbah cair (whey) tahu pada produksi nata de soya (kajian waktu inkubasi) pollution. *Teknologi Pertanian*, 3(2), 93.
- Novikov, I. V., Pigaleva, M. A., Naumkin, A. V., Badun, G. A., Levin, E. E., Kharitonova, E. P., Gromovykh, T. I., & Gallyamov, M. O. (2021). Green approach for fabrication of bacterial cellulose-chitosan composites in the solutions of carbonic acid under high pressure CO₂. *Carbohydrate Polymers*, 258(January), 117614. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117614>.
- Pacheco, G., de Mello, C. V., Chiari-Andréo, B. G., Isaac, V. L. B., Ribeiro, S. J. L., Pecoraro, É., & Trovatti, E. (2018). Bacterial cellulose skin masks—properties and sensory tests. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 17(5), 840–847. <https://doi.org/10.1111/jocd.12441>.
- Pahlevi, M. A., Junaidi, R., & Hc, F. (2020). Prototipe baterai berbasis karbon aktif dari bambu betung (tinjauan pengaruh karbon aktif dan elektrolit dalam meningkatkan daya baterai). *Kinetika*, 11(01), 55–60.
- Panto, H. (2018). *Dasar teknik listrik*. Yogyakarta.
- Perugini, P., Bleve, M., Cortinovis, F., & Colpani, A. (2018). Biocellulose masks as delivery systems: A novel methodological approach to assure quality and safety. *Cosmetics*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/cosmetics5040066>

- Piluharto, B., Sjaifullah, A., Rahmawati, I., & Nurhianto, E. (2020). Membran blend kitosan/poli vinil alkohol (PVA): pengaruh komposisi material blend, pH, dan konsentrasi bahan pengikat silang. *Jurnal Kimia Riset*, 2(2), 112–129.
- Qiao, K., Zheng, Y., Guo, S., Tan, J., Chen, X., Li, J., Xu, D., & Wang, J. (2015). Hydrophilic nanofiber of bacterial cellulose guided the changes in the micro-structure and mechanical properties of nf-BC/PVA composites hydrogels. *Composites Science and Technology*, 118, 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.08.004>
- Radiman, C. L., & Yuliani, G. (2007). Penggunaan nata de coco sebagai bahan membran selulosa asetat. *Makara, Sains*, 11(2), 80–84.
- Rahadi, B., Setiani, P., & Antonius, R. (2020). Karakteristik bioplastik berbahan dasar limbah cair tahu (whey) dengan penambahan kitosan dan gliserol. *Jurnal Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 7(2), 81–89. <https://doi.org/10.21776/ub.jsal.2020.007.02.5>
- Ridha, M., & Darminto. (2016). Analisis densitas, porositas, dan struktur mikro batu apung lombok dengan variasi lokasi dan kedalaman. *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, 12(3), 124–130. <https://doi.org/10.12962/j24604682.v12i3.1403>
- Sai, H., Xing, L., Xiang, J., Cui, L., Jiao, J., Zhao, C., Li, Z., & Li, F. (2013). Flexible aerogels based on an interpenetrating network of bacterial cellulose and silica by a non-supercritical drying process. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(27), 7963–7970. <https://doi.org/10.1039/c3ta11198a>.
- Saibuitong & Philsalaphong. (2010). Overview of bacterial composite: a multipurpose advanced material. *Materials*, 2(2), 324–368.
- Sankarganesh, P., Parthasarathy, V., Ganesh Kumar, A., Ragu, S., Saraniya, M., Udayakumari, N., & Anbarasan, R. (2022). Preparation of cellulose-PVA blended hydrogels for wound healing applications with controlled release of the antibacterial drug: an in vitro anticancer activity. *Biomass Conversion and Biorefinery*, April. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02586-y>
- Santos, F. A. dos, & Tavares, M. I. B. (2014). Development and characterization of hybrid materials based on biodegradable PLA matrix, microcrystalline cellulose and organophilic silica. *Polimeros*, 24(5), 561–566. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1653>
- Satriady, A., Alamsyah, W., Saad, H. I., & Hidayat, S. (2016). Pengujian pengaruh luas elektroda terhadap karakteristik baterai LiFePO₄. *Jurnal Material Dan Energi Indonesia*, 6(02), 43–48. <https://jurnal.unpad.ac.id/jmei/article/view/10959>
- Seroka, N. S., Taziwa, R., & Khotseng, L. (2022). Green synthesis of crystalline silica

- from sugarcane bagasse ssh: physico-chemical properties. *Nanomaterials*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/nano12132184>
- Shah, J., & Brown, R. M. (2005). Towards electronic paper displays made from microbial cellulose. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 66(4), 352–355. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1756-6>
- Sharma, D., Kumari, M., & Dhayal, V. (2021). Fabrication and characterization of cellulose/pva/tio2 nanocomposite thin film as a photocatalyst. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2970–2974. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.323>
- Shi, J., Lu, L., Guo, W., Zhang, J., & Cao, Y. (2013). Heat insulation performance, mechanics and hydrophobic modification of cellulose-SiO₂ composite aerogels. *Carbohydrate Polymers*, 98(1), 282–289. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.05.082>
- Sonker, A. K., Rathore, K., Teotia, A. K., Kumar, A., & Verma, V. (2019). Rapid synthesis of high strength cellulose–poly(Vinyl alcohol) (PVA) biocompatible composite films via microwave crosslinking. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(17), 27–30. <https://doi.org/10.1002/app.47393>
- Souisa, G. M., Sidharta, B. R., & Pranata, F. S. (2019). Pengaruh acetobacter xylinum dan ekstrak kacang hijau (*Phaseolus radiatus* L.) terhadap produksi nata dari substrat limbah cair tahu. *Biota : Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Hayati*, XI(1), 27–33. <https://doi.org/10.24002/biota.v11i1.2819>
- Sukarta, I. N. (2020). Sintesis membran nata de pina dan aplikasinya untuk adsorpsi zat warna tekstil Remazol Red RB. *Jurnal Kimia (Journal of Chemistry)*, 14(2), 134–141.
- Sulastri, S., & Kristianingrum, S. (2010). Berbagai macam senyawa silika : sintesis, karakterisasi dan pemanfaatan. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan Dan Penerapan MIPA*, 211–216.
- Susanto, Y. I., & Supardi, Z. A. I. (2019). Pengaruh penambahan cellulose acetat pada komposit polyvinildene flouride-cellulose acetat doping Al(OH)₃ sebagai separator baterai lithium ion. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, 8(01), 15–18.
- Syamsu, K., & Kuryani, T. (2014). Pembuatan biofilm selulosa asetat dari selulosa mikrobial nata de cassava. *E-Junal Agroindustri Indonesia*, 3(1), 126–133. <http://tin.fateta.ipb.ac.id/journal/e-jaii>
- Tai, M. H., Mohan, B. C., Yao, Z., & Wang, C. H. (2022). Superhydrophobic leached carbon black/poly(vinyl) alcohol aerogel for selective removal of oils and organic compounds from water. *Chemosphere*, 286(P1),

131520.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131520>
- Tanpichai, S., Witayakran, S., Srimarut, Y., Woraprayote, W., & Malila, Y. (2019). Porosity, density and mechanical properties of the paper of steam exploded bamboo microfibers controlled by nanofibrillated cellulose. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(4), 3612–3622.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.05.024>
- Ullah, M. W., Ul-Islam, M., Khan, S., Kim, Y., & Park, J. K. (2016). Structural and physico-mechanical characterization of bio-cellulose produced by a cell-free system. *Carbohydrate Polymers*, 136, 908–916.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.10.010>
- Urbina, L., Guaresti, O., Requies, J., Gabilondo, N., Eceiza, A., Corcuera, M. A., & Retegi, A. (2018). Design of reusable novel membranes based on bacterial cellulose and chitosan for the filtration of copper in wastewaters. *Carbohydrate Polymers*, 193, 362–372.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.007>
- Wahid, F., Zhao, X. J., Duan, Y. X., Zhao, X. Q., Jia, S. R., & Zhong, C. (2021). Designing of bacterial cellulose-based superhydrophilic/underwater superoleophobic membrane for oil/water separation. *Carbohydrate Polymers*, 257(January), 117611.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117611>
- Wang, Y., Zhang, Q., Li, P., & Huang, J. T. (2022). A durable and sustainable superhydrophobic surface with intertwined cellulose/SiO₂ blends for anti-icing and self-cleaning applications. *Materials and Design*, 217, 110628.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110628>
- Warastuti, Y., Emil, B., & Darmawan. (2015). Jurnal sains materi indonesia sintesis dan karakterisasi membran komposit hidroksiapatit tulang sapi-khitosan-poli(vinil alkohol) untuk aplikasi biomaterial. *Sains Materi Indonesia*, 16(3000), 83–90.
- Widyastuti, F. K. (2017). Sintesis membran selulosa asetat dari selulosa bakterial nata de bamboo dan aplikasinya sebagai membran mikrofiltrasi. *Prosiding Seminar Nasional Kimia UNY*, 2(14), 313–318.
- Wu, Z.-Y., Li, C., Liang, H.-W., Chen, J.-F., & Yu, S.-H. (2013). Ultralight, flexible, and fire-resistant carbon nanofiber aerogels from bacterial cellulose. *Angewandte Chemie*, 125(10), 2997–3001.
<https://doi.org/10.1002/ange.201209676>
- Xu, K., Qin, Y., Xu, T., Xie, X., Deng, J., Qi, J., & Huang, C. (2019). Combining polymeric membranes with inorganic woven fabric: Towards the continuous and affordable fabrication of a multifunctional separator for lithium-ion battery. *Journal of Membrane Science*, 592(August), 117364.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci>

2019.117364

- Xue, Y., Qi, L., Lin, Z., Yang, G., He, M., & Chen, J. (2021). High-strength regenerated cellulose fiber reinforced with cellulose nanofibril and nanosilica. *Nanomaterials*, *11*(10). <https://doi.org/10.3390/nano11102664>
- Yano, S., Maeda, H., Nakajima, M., Hagiwara, T., & Sawaguchi, T. (2008). Preparation and mechanical properties of bacterial cellulose nanocomposites loaded with silica nanoparticles. *Cellulose*, *15*(1), 111–120. <https://doi.org/10.1007/s10570-007-9152-x>
- Yasa, I. W. S., Basuki, E., Saloko, S., & Handito, D. (2020). Sifat fisik dan mekanis lembaran kering selulosa bakteri berbahan dasar limbah hasil pertanian. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Pertanian Dan Biosistem*, *8*(1), 89–99. <https://doi.org/10.29303/jrpb.v8i1.170>
- Yu, Y., Ma, Q., Zhang, J. bin, & Liu, G. bin. (2020). Electrospun SiO₂ aerogel/polyacrylonitrile composited nanofibers with enhanced adsorption performance of volatile organic compounds. *Applied Surface Science*, *512*(November 2019), 145697. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145697>
- Zhao, X. Q., Wahid, F., Cui, J. X., Wang, Y. Y., & Zhong, C. (2021). Cellulose-based special wetting materials for oil/water separation: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, *185*(29), 890–906. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.167>
- Zhijiang, C., & Guang, Y. (2011). Bacterial cellulosa/collagen composite: characterization and first evaluation of cytocompatibility. *Journal of Applied Polymer Science*, *120*(2011), 2938–2944. <https://doi.org/10.1002/app>
- Zhou, H. (2016). *Physico-chemical properties of bioplastics and its application for fresh-cut fruits packaging* [Hokkaido University Japan]. <https://doi.org/10.14943/doctoral.k12258>