

PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI SERAT *HOLLOW* DARI SELULOSA BAKTERIAL DENGAN NANOPARTIKEL ZnO UNTUK PENGOLAHAN AIR LIMBAH TEKSTIL

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF HOLLOW FIBER FROM BACTERIAL CELULOSE WITH ZnO NANOPARTICLES FOR TEXTILE WASTEWATER TREATMENT

Rizka Yulina, Srie Gustiani, Wulan Septiani

Balai Besar Tekstil, Jalan Jenderal Ahmad Yani No. 390 Bandung
E-mail: texirdti@bdg.centrin.net.id

Tanggal diterima: 7 Maret 2014, direvisi: 2 April 2014, disetujui terbit: 17 April 2014

ABSTRAK

Selulosa bakterial mempunyai sifat mekanik yang baik untuk digunakan sebagai membran pada proses pengolahan air limbah tekstil. Pada penelitian ini dilakukan pembuatan dan karakterisasi serat *hollow* dari bahan baku selulosa bakterial nata de coco dengan penambahan nanopartikel ZnO sebagai fotokatalis terimmobilisasi. Selulosa bakterial disintesis menggunakan bakteri *Acetobacter xylinum* di dalam medium air kelapa dan gula. Selulosa bakterial dilarutkan bersama dengan nanopartikel ZnO menggunakan pelarut cupriethylen diamina (Cuen) dengan variasi selulosa bakterial 2,25% dan 2,50%. Serat berbentuk *hollow* dihasilkan dari proses *wet spinning* menggunakan koagulan NaOH. Serat *hollow* yang telah melalui koagulan kemudian direndam dalam larutan asam, gliserol, dan alkohol, dengan variasi waktu perendaman asam selama 1 dan 2 hari. Uji kekuatan tarik menunjukkan hasil yang terbaik yakni sebesar 815,72 gf pada konsentrasi selulosa bakterial 2,50% dan perendaman asam selama 2 hari. Dari hasil uji gugus fungsi menggunakan spektroskopi *Fourier Transform Infra Red* (FTIR), terdapat beberapa gugus fungsi yang menunjukkan keberadaan selulosa dan nanopartikel ZnO. Proses dekolonisasi fotokatalitik terhadap air limbah tekstil artifisial yang mengandung zat warna reaktif *Remazol Black 5* (RB5) menunjukkan bahwa pH optimum proses penyisihan warna yakni pada pH 9 dan dihasilkan persen penyisihan warna yang tertinggi yaitu 90,32%. Pada kondisi yang sama, proses dekolonisasi RB5 menggunakan serat *hollow* tanpa nanopartikel ZnO hanya menghasilkan persen penyisihan warna sebesar 32,10%. Berdasarkan laju penyisihan zat warna, aktivitas degradasi fotokatalitik terbesar ($k' = 0,2615$) diperoleh pada konsentrasi ZnO 10% dan konsentrasi zat warna RB5 10 ppm.

Kata kunci: selulosa bakterial, *wet spinning*, serat *hollow*, nanopartikel ZnO, fotokatalitik.

ABSTRACT

Bacterial cellulose has good mechanical properties to be used as membrane for textile wastewater treatment process. In this study, the synthesize and characterization of hollow fiber from bacterial cellulose material of nata de coco with addition of ZnO nanoparticles as immobilized photocatalytic agent were done. The bacterial cellulose was synthesized using Acetobacter xylinum bacteria in sugar and coconut water medium. The bacterial cellulose was dissolved together with ZnO nanoparticles using cupriethylene diamine (Cuen) solvent with concentration variation of 2,25% and 2,50% bacterial cellulose. The hollow fiber was formed through the wet spinning process with NaOH as coagulant. Then, it was immersed in acid solution, glycerol, and alcohol, with 1 and 2 days acid immersion variation time. The best tensile strength testing result was around 815,72 gf at 2,50% concentration of bacterial cellulose and 2 days acid immersion. From the functional group testing result using Fourier Transform Infra Red spectroscopy (FTIR), there were some functional groups regarding to the presence of cellulose and ZnO nanoparticles. Photocatalytic decolorization process of artificial textile wastewater containing Remazol Black 5 (RB) reactive dye was found optimized at pH 9 and reached the maximum color degradation percentage 90,32%. At the same condition, the decolorization process of RB5 using hollow fiber membrane without ZnO nanoparticles only resulted the color degradation percentage of 32,10%. Based on the decolorization rate, the maximum photocatalytic degradation activity ($k'=0,2615$) was obtained at concentration of ZnO 10% and concentration of RB5 dye 10 ppm.

Keywords: bacterial cellulose, *wet spinning*, hollow fiber, ZnO nanoparticles, photocatalytic.

PENDAHULUAN

Masalah pencemaran lingkungan yang diakibatkan oleh kegiatan industri khususnya industri tekstil harus menjadi perhatian, karena air limbah berwarna yang dihasilkan dari kegiatan industri tersebut pada umumnya bersifat toksik.¹ Selain menghasilkan air limbah, industri tekstil merupakan salah satu industri yang melakukan eksploitasi terhadap sumber daya air. Salah satu upaya untuk menanggulangi masalah tersebut adalah penerapan teknologi proses pengolahan efluen limbah cair dari Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL).

Komponen warna dan garam-garam anorganik terkandung dalam jumlah yang cukup besar di dalam air limbah tekstil. Pengolahan air limbah tekstil di Jawa Barat umumnya menggunakan metode koagulasi, adsorpsi, filtrasi dan biologi aerobik. Sejumlah penelitian mengamati bahwa zat warna dan berbagai senyawa organik lainnya pada air limbah tekstil masih sulit terdegradasi melalui proses biologi aerobik.² Pengolahan koagulasi, adsorpsi dan membran mampu menghilangkan warna pada air limbah dengan cukup baik, namun tidak mampu mendestruksi senyawa organik pada air limbah tekstil berwarna serta menghasilkan limbah padat yang harus dikelola lebih lanjut.³ Adanya sisa warna dan zat organik pada efluen IPAL dengan metode konvensional membutuhkan teknologi pengolahan lanjutan untuk dimanfaatkan ulang sebagai air bersih ataupun air proses.

Teknologi pengolahan lanjut seperti *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) telah banyak dipelajari untuk mendegradasi senyawa organik, anorganik serta warna pada air limbah. Salah satu metode AOPs yang pernah diteliti adalah metode fotokatalitik,^{4,5,6,7,8} namun pada proses ini masih memiliki kekurangan yaitu harus memisahkan antara katalis yang tersuspensi dengan larutannya.⁹ Penggunaan semikonduktor sebagai fotokatalis merupakan tema yang sangat menarik saat ini karena kemampuannya untuk mendegradasi senyawa-senyawa di sekitarnya dengan menggunakan sinar. Proses ini adalah proses yang mudah dan dapat dipakai ulang, serta ramah lingkungan. Fotokatalis ini dapat diaplikasikan sebagai antikabur, penghilang bau, material *self-cleaning* pemurnian dan penjernihan air, anti bakteri, dan telah dapat digunakan sebagai anti tumor/kanker.^{4,5,8,10} Selain untuk mendegradasi senyawa, fotokatalis juga digunakan sebagai pembangkit listrik tenaga cahaya. Fotokatalis yang paling banyak dipelajari adalah TiO₂ dan ZnO yang memiliki energi celah atau *band gap Eg* yang sama (3,2 eV) dan memiliki fotosensitivitas dan kestabilan yang sangat tinggi.^{11,12,13} ZnO merupakan alternatif fotokatalis semikonduktor

selain TiO₂. Penambahan *loading* katalis ZnO sebanyak 2,4 g pada 400 ml larutan metilen biru yang disinari UV selama 2 jam mampu meningkatkan degradasi warna sebesar 54% dibandingkan proses fotolisis saja (tanpa keberadaan katalis).¹⁴

Untuk meningkatkan efektivitas fotokatalitik, maka perlu dilakukan modifikasi terhadap fotokatalis. Efektivitas fotokatalis dapat ditingkatkan melalui modifikasi permukaan yaitu pelapisan ZnO pada permukaan media. Modifikasi dapat berupa komposit, dimana polimer yang digunakan untuk pembuatan komposit dengan proses *wet spinning* bisa bermacam-macam baik sintetik maupun biopolimer. Salah satu polimer yang digunakan adalah biopolimer dari selulosa bakterial (SB). Biopolimer SB merupakan bioselulosa yang dihasilkan dari proses fermentasi air kelapa dengan menggunakan bakteri *Acetobacter xylinum*.¹⁵ Sebagaimana diketahui, Indonesia sebagai negara tropis memiliki banyak tanaman kelapa, namun hingga saat ini pemanfaatan air kelapa sebagai limbahnya belum banyak diketahui,¹⁶ maka limbah air kelapa tersebut dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan membran SB. Keunggulan dari SB adalah memiliki struktur dan sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan polimer lainnya.^{15,17} SB dapat dimodifikasi menjadi berbentuk serat *hollow* untuk memperluas permukaan kontak sehingga meningkatkan degradasi zat warna dan senyawa organik. Pada penelitian terdahulu,¹⁸ serat *hollow* yang terbuat dari polipropilen untuk proses fotokatalitik berhasil mendegradasi zat warna azo *Acid Red 1 (AR1)* dan terseparasi sempurna dengan larutan zat warna. Serat-serat *hollow* ini dikumpulkan menjadi satu kumpulan modul membran pada reaktor membran fotokatalitik. Serat *hollow* yang terbuat dari SB dan diimmobilisasi dengan fotokatalis nanopartikel ZnO (SB-ZnO) dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja proses degradasi fotokatalitik UV/ZnO di dalam proses pengolahan efluen limbah cair tekstil.

Tujuan dari penelitian ini adalah menemukan parameter proses yang optimum pada pembuatan serat *hollow* selulosa bakterial dengan penambahan nanopartikel ZnO (SB-ZnO) dan mengkarakterisasi serat tersebut untuk diaplikasikan pada pengolahan air limbah zat warna dengan proses fotokatalitik. Karakteristik serat *hollow* SB-ZnO yang dibahas dalam tulisan ini mencakup kekutan tarik, gugus fungsi, dan morfologi serat, juga dijelaskan mengenai pengaruh serat *hollow* SB-ZnO terhadap performa degradasi/penyisihan warna secara fotokatalitik terhadap air limbah zat warna.

METODE

Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi air kelapa untuk pembuatan

media steril bakteri *Acetobacter xilynum*, bakteri *Acetobacter xilynum* (Laboratorium KPP Bioteknologi ITB), cupriethylenediamina (Merck), asam asetat teknis (Brataco), ammonium sulfat, gula, natrium hidroksida p.a. (Merck), natrium hidroksida teknis (Brataco), ZnO nanopartikel (Sigma Aldrich) memiliki ukuran rata-rata partikel 5 nm, gliserol (Brataco), alkohol (Brataco), aquadest, serta zat warna reaktif *Remazol Black 5* (Sigma Aldrich).

Pembuatan selulosa bakterial nata de coco

Selulosa bakterial dibuat dari air kelapa yang difermentasi menggunakan bakteri *Acetobacter xylinum*. Medium fermentasi dalam pembuatan bioselulosa ini terdiri dari air kelapa sebanyak 1 L. Air kelapa dilarutkan bersama larutan gula 2%, ammonium sulfat 1,5% dan asam asetat hingga homogen dan disterilisasi menggunakan *autoclave*. Kemudian ditambahkan *starter* bakteri *Acetobacter xylinum* dan diinkubasi pada suhu 30°C di dalam inkubator selama 3 hari. SB dalam bentuk gel yang dihasilkan, dicuci dengan air sampai pH netral, kemudian direndam dalam larutan NaOH 2%, selanjutnya dicuci kembali sampai dengan pH netral.¹⁷ SB yang dihasilkan kemudian digunakan sebagai bahan baku pembuatan serat *hollow* SB-ZnO.

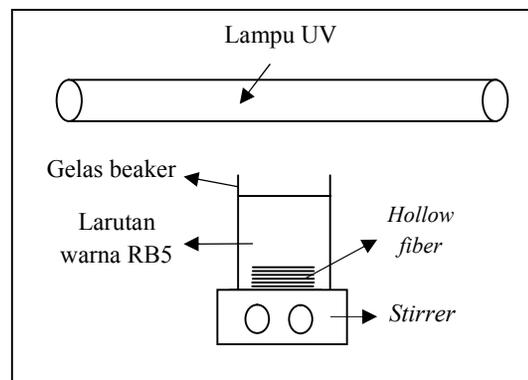
Pembuatan serat *hollow* selulosa bakterial

Pembuatan serat *hollow* selulosa bakterial-ZnO (SB-ZnO) dilakukan dengan menggunakan alat pemintalan basah (*wet spinning*). SB dengan variasi konsentrasi 2,25% dan 2,5% dilarutkan dengan cupriethylenediamina dan diaduk hingga homogen selama 8 jam, setelah larut ditambahkan nanopartikel ZnO dengan variasi konsentrasi 5, 10 dan 15%. Setelah larut sempurna, larutan tersebut dibuat serat *hollow* dengan *wet spinning* dan dilewatkan ke dalam koagulan NaOH selama 24 jam. Kemudian dinetralkan menggunakan larutan asam dengan variasi waktu selama 1 dan 2 hari dan direndam di dalam larutan gliserol dan alkohol.

Eksperimen fotokatalitik pengolahan air limbah zat warna

Percobaan dekolonisasi fotokatalitik menggunakan serat *hollow* SB-ZnO dilakukan terhadap air limbah tekstil artifisial yang mengandung zat warna reaktif *Remazol Black 5* (RB5). Variasi konsentrasi zat warna reaktif RB5 yang digunakan yakni 5, 10 dan 15 ppm, sedangkan variasi konsentrasi nanopartikel ZnO sebagai katalis yakni 5, 10, dan 15% (distribusi katalis 0,095; 0,19 dan 0,285 mg/cm²). Larutan zat warna reaktif RB5 sebanyak 100 ml mengalami proses fotokatalitik di dalam reaktor *batch* skala laboratorium. Reaktor proses fotokatalitik dilengkapi dengan lampu UV-C 3 x 15 watt (Vilber Lourmat) dengan panjang

gelombang 245 nm. Diagram skematis reaktor sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram skematis reaktor proses fotokatalitik

Karakterisasi dan analisis

Penentuan sifat mekanik serat *hollow* dilakukan dengan cara pengujian kekuatan tarik serat. Pengujian kekuatan tarik dilakukan berdasarkan standar pengujian kekuatan tarik ASTM D 882-02¹⁹ menggunakan alat Textechno Statimat ME Test. Analisis gugus fungsi serat *hollow* SB-ZnO dilakukan dengan spektroskopi *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) (Shimadzu Prestige). Foto morfologi penampang serat *hollow* diperoleh dari mikroskop digital (Leica MS 5). Pengukuran pH menggunakan pH meter (Schoot Gerate Handylab 1). Pengukuran absorbansi untuk analisis konsentrasi zat warna dilakukan dengan spektrofotometer UV-Vis (Perkin Elmer Lambda 35).

Perhitungan laju penyisihan zat warna

Perhitungan terhadap laju penyisihan zat warna dilakukan untuk mengetahui kinetika reaksi proses fotokatalitik untuk menyisihkan zat warna. Pengukuran absorbansi zat warna dilakukan pada awal sebelum proses degradasi fotokatalitik dan ketika proses berlangsung setiap 15 menit sekali selama 2 jam. Nilai konsentrasi zat warna dihitung dengan menggunakan persamaan yang diperoleh dari kurva kalibrasi zat warna RB5 dan dengan memasukkan nilai absorbansi hasil pengukuran spektrofotometer ke dalam persamaan tersebut.

Konstanta laju penyisihan zat warna (k') dihitung dengan menggunakan persamaan pseudo orde pertama Langmuir-Hinshelwood (Persamaan 1).²⁰

$$\ln \left(\frac{C_0}{C} \right) = kKt = k't \quad (1)$$

Dimana :

C_0 : konsentrasi zat warna awal, mg.L⁻¹

C : konsentrasi zat warna pada waktu t, mg.L⁻¹

k : konstanta laju reaksi, menit⁻¹

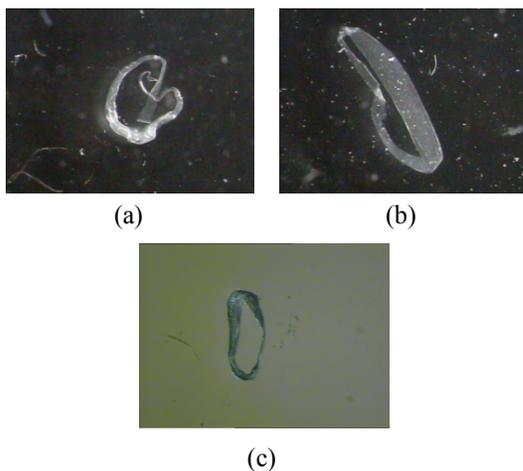
K : koefisien adsorpsi, L.mg⁻¹

t : waktu irradiasi, menit
 k' : konstanta laju penyisihan zat warna, menit⁻¹

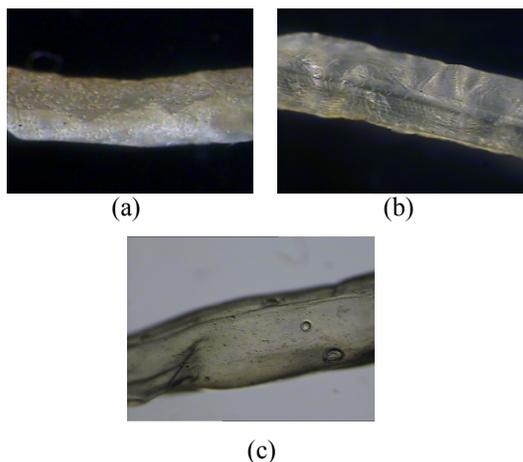
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil sintesis dan karakterisasi serat *hollow* SB-ZnO

Serat *hollow* SB-ZnO telah disintesis dengan berbagai variasi konsentrasi SB dan nanopartikel ZnO. Foto mikroskop morfologi serat *hollow* SB-ZnO yang telah dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3. Pada Gambar 2 yang menunjukkan penampang melintang serat, terlihat bahwa serat yang berbentuk *hollow* telah dihasilkan meskipun bentuk *hollow* belum beraturan. Sedangkan pada Gambar 3 yang menunjukkan penampang membujur serat, terlihat bentuk permukaan serat SB-ZnO dengan diameter serat *hollow* yang bervariasi yakni antara 0,54-1,07 mm.



Gambar 2. Foto mikroskop penampang melintang serat *hollow*: (a) SB-ZnO 5%, (b) SB-ZnO 10%, (c) SB-ZnO 15% (perbesaran 51x)



Gambar 3. Foto mikroskop penampang membujur serat *hollow*: (a) SB-ZnO 5%, (b) SB-ZnO 10%, (c) SB-ZnO 15% (perbesaran 51x)

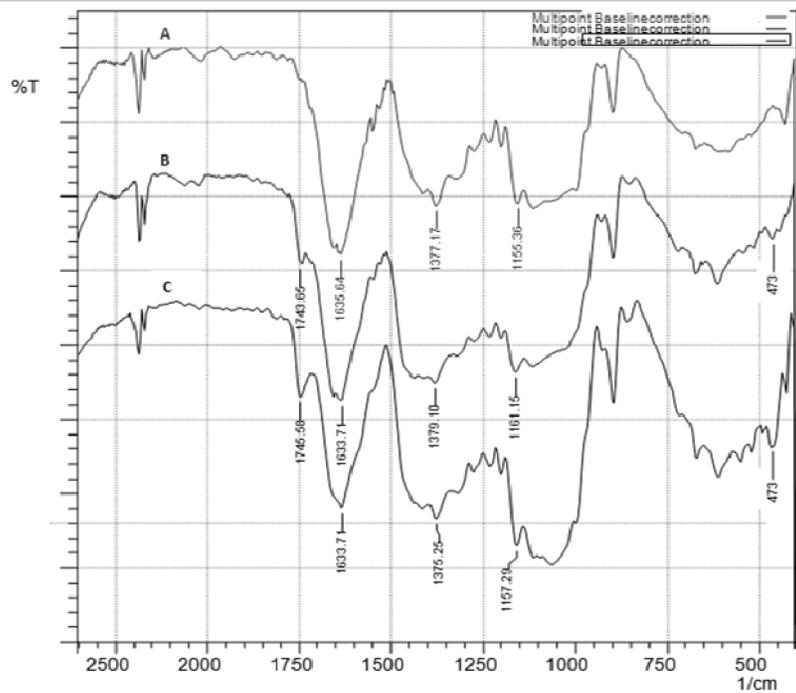
Berdasarkan hasil uji kekuatan tarik pada Tabel 1, nilai maksimum kekuatan tarik serat *hollow* SB-ZnO cukup tinggi yakni mencapai 815,72 gf, yang diperoleh pada konsentrasi larutan SB 2,50% dan waktu perendaman asam selama 2 hari. Kekuatan tarik yang tinggi berpotensi menjadikan serat *hollow* lebih tahan terhadap tekanan air yang tinggi apabila digunakan pada proses pengolahan limbah. Kekuatan tarik yang cukup tinggi disebabkan oleh perlakuan alkali yaitu NaOH sebagai penguat ikatan hidrogen antara molekul, selain itu juga akan menambah kristalinitas pada ikatan selulosa.²¹ Pada konsentrasi SB yang lebih tinggi, kekuatan tarik meningkat disebabkan karena meningkatnya kepadatan material selulosa yang membentuk serat *hollow*. Pada diameter spinneret 5 mm, perendaman asam dengan waktu yang lebih lama (2 hari) menyebabkan kekuatan tarik meningkat. Hal ini disebabkan karena setelah proses koagulasi serat, terjadi proses penetralan NaOH oleh asam yang lebih sempurna dengan bertambahnya waktu perendaman. Namun pada diameter spinneret yang lebih kecil (3 mm), penambahan waktu perendaman asam menyebabkan turunnya kekuatan tarik yang disebabkan karena serat *hollow* dengan diameter yang lebih kecil akan lebih mudah terdegradasi oleh larutan asam.

Tabel 1. Pengaruh konsentrasi larutan dan diameter spinneret terhadap kekuatan tarik dan elongasi serat *hollow* SB-ZnO

Serat <i>Hollow</i> SB-ZnO			Kekuatan Tarik rata-rata (g)	Elongasi rata-rata (%)
Konsentrasi larutan (%)	Diameter Spinneret (mm)	Perendaman Asam (hari)		
2,25	5	1	620,01	14,15
2,25	5	2	799,13	56,01
2,50	5	1	666,51	5,72
2,50	5	2	815,72	62,86
2,25	3	1	516,19	11,21
2,25	3	2	263,17	7,20

Pada diameter spinneret yang lebih besar (5 mm), perendaman asam yang lebih lama menyebabkan elongasi rata-rata serat meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa walaupun kekuatan tarik cukup tinggi tapi kekakuan (*stiffness*) serat masih rendah.

Hasil FTIR serat *hollow* SB tanpa ZnO dan SB-ZnO ditunjukkan pada Gambar 4. Puncak serapan gugus fungsi hidrosil (O-H) dapat diidentifikasi pada bilangan gelombang 3412,08 cm⁻¹- 3469,94 cm⁻¹ (spektrum tidak ditampilkan di gambar), sedangkan gugus C-O dapat diidentifikasi pada bilangan gelombang 1155,36 cm⁻¹ baik pada



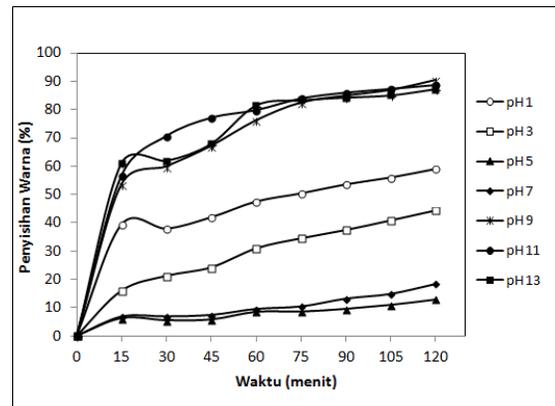
Gambar 4. Spektrum FTIR serat *hollow* : (A). SB 2,5%, (B). SB 2,5%, ZnO 10%, dan (C). SB 2,25%, ZnO 10%

serat *hollow* SB tanpa ZnO maupun SB-ZnO. Kedua gugus fungsi ini merupakan karakteristik dari selulosa bakterial nata de coco. Serapan dari gugus ini menunjukkan adanya ikatan glikosida dan ikatan C-O pada cincin selulosa.²² Pada kurva B dan C, muncul gugus karbonil (C=O) pada bilangan gelombang 1743,65 cm^{-1} dan 1745,58 cm^{-1} yang menunjukkan kemungkinan terjadinya interaksi antara gugus karbon pada selulosa bakterial dengan nanopartikel ZnO. Puncak serapan pada bilangan gelombang 473 cm^{-1} menunjukkan adanya ikatan Zn-O dan membuktikan keberadaan dari nanopartikel ZnO.²³ Pada kurva B dan C terlihat munculnya puncak serapan ZnO, yang tidak tampak pada kurva A. Hal ini menunjukkan bahwa proses immobilisasi nanopartikel ZnO pada SB berhasil dilakukan. Perbedaan konsentrasi SB pada kurva B dan C, tidak berpengaruh pada karakteristik puncak yang terbentuk pada spektrum FTIR.

Optimasi proses fotokatalitik

Parameter pH pada reaksi proses fotokatalitik merupakan parameter yang penting dalam penyisihan zat warna. Setiap zat warna memiliki pH optimum yang berbeda, tergantung pada jenis zat warna dan kondisi pada saat itu. Grafik penentuan pH optimum ditunjukkan pada Gambar 5. Percobaan penentuan pH optimum dilakukan dengan mengukur nilai absorbansi dari masing-masing variasi pH. Percobaan dilakukan selama 120 menit dengan volume 100 ml dan

konsentrasi zat warna RB5 10 ppm. Dari hasil percobaan, pH optimum berada pada pH 9 dengan efisiensi penyisihan warna adalah 90,32%. Berdasarkan hasil tersebut, maka ditentukan bahwa kondisi pH pada percobaan selanjutnya berada pada pH 9.



Gambar 5. Kurva optimasi pH

Pada Gambar 5, terlihat kecenderungan meningkatnya penyisihan warna seiring dengan peningkatan pH atau dengan kata lain penyisihan warna yang tinggi terjadi pada pH basa. Pada pH asam, warna hitam dari air limbah artifisial RB5 mengalami dekolorisasi menjadi berwarna biru, sedangkan pada pH basa, warna larutan berubah dari hitam menjadi berwarna merah muda. Pada pH

tinggi, radikal hidroksil dapat dibentuk oleh reaksi antara ion hidroksida dan *hole* positif. Kehadiran ion hidroksida yang banyak dapat memudahkan dalam pembentukan radikal bebas. Dengan demikian, efisiensi penyisihan warna akan terjadi seiring dengan bertambahnya OH⁻ (pH basa). Hal tersebut menunjukkan bahwa reaksi utama pada penyisihan warna adalah serangan radikal hidroksil yang dapat dicapai pada pH tinggi.²⁴ Sebaliknya, efisiensi fotodegradasi sangat kecil pada pH asam karena konsentrasi OH⁻ dalam larutan lebih sedikit dibandingkan pada pH basa sehingga jumlah OH• yang terbentuk juga berkurang. Selain itu, ZnO merupakan oksida amfoter yang dapat terlarut pada kondisi asam dan alkali sehingga pada pH rendah, ZnO akan mudah terdisolusi dan dapat menurunkan efektivitas katalis dalam proses fotodegradasi.²⁵

Pengaruh konsentrasi katalis pada proses fotokatalitik

Katalis digunakan untuk meningkatkan efisiensi penurunan konsentrasi warna. Secara logis, semakin tinggi konsentrasi katalis yang digunakan akan semakin besar efisiensi penurunan konsentrasi warna. Penambahan jumlah katalis sebenarnya meningkatkan jumlah bagian yang aktif pada permukaan fotokatalis sehingga meningkatkan produksi OH•.

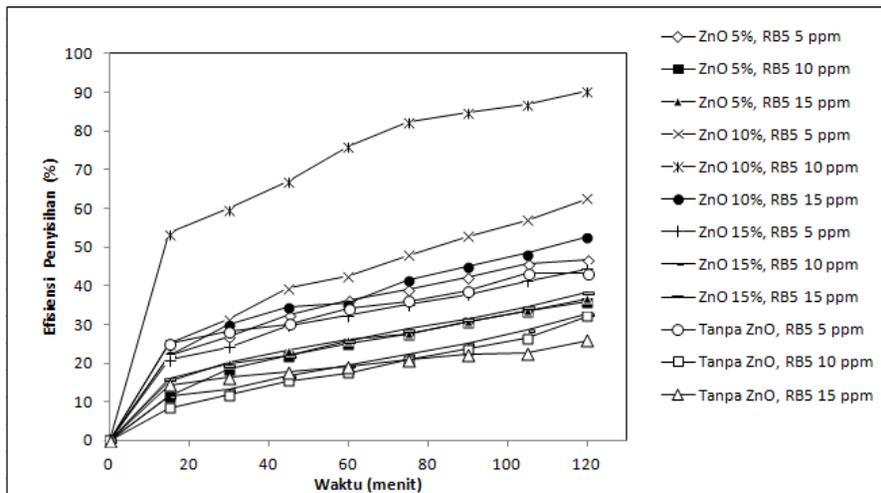
Grafik efisiensi penyisihan warna pada berbagai konsentrasi ZnO dapat dilihat pada Gambar 6. Pada proses pengolahan limbah dengan menggunakan membran, proses adsorpsi dan filtrasi sangat berkontribusi dalam proses penyisihan warna. Namun pada penelitian ini, pengolahan air limbah warna artifisial dengan proses membran belum sepenuhnya dilakukan. Percobaan penyisihan warna dengan menggunakan serat *hollow* SB tanpa ZnO dilakukan hanya untuk mengetahui peran serat *hollow* SB pada proses adsorpsi zat warna saja.

Proses pengolahan air limbah tekstil artifisial RB5 menunjukkan penyisihan warna yang sangat tinggi, disebabkan terjadinya reaksi fotoinduksi yang diakselerasi oleh adanya katalis yaitu ZnO. Reaksi ini diaktivasi oleh absorpsi foton dengan energi yang sama atau lebih tinggi dari energi celah pita/band – gap energi (E_{bg}) katalis. Ketika katalis mengabsorpsi energi foton yang mencukupi dari radiasi UV, elektron terpromosikan dari pita valensi ke pita konduksi menghasilkan pasangan lubang elektron (e^-_{cb} dan h^+_{vb}). Katalis ZnO lebih tinggi pada daerah UV (ultraviolet) karena *bandgap* ZnO yang besar (3,2 eV) sehingga energi sinar UV yang dapat menyebabkan fotokonduksi pada permukaan ZnO.²⁶

e^-_{cb} dan h^+_{vb} masing-masing adalah elektron pada pita konduksi dan elektron pada pita valensi. Keduanya dapat berpindah pada permukaan katalis, untuk melangsungkan reaksi redoks dengan spesies lain yang ada di permukaan. Dalam banyak kasus, h^+_{vb} mudah bereaksi dengan H₂O di permukaan untuk memproduksi OH radikal sedangkan e^-_{cb} bereaksi dengan O₂ untuk menghasilkan anion oksigen radikal superoksida. Reaksi ini mencegah kombinasi elektron dan lubang yang dihasilkan pada tahap pertama. OH• dan O₂•⁻ yang dihasilkan dengan cara di atas dapat bereaksi dengan zat warna untuk membentuk spesies lain dan kemudian berkontribusi dalam penyisihan zat warna.

Laju penyisihan zat warna

Analisis laju penyisihan zat warna dilakukan untuk mengetahui kinetika reaksi yang terjadi pada proses fotokatalitik zat warna RB5. Penyisihan zat warna pada setiap variasi baik konsentrasi ZnO maupun konsentrasi limbah zat warna dihitung laju penyisihan zat warnanya. Pengaruh konsentrasi fotokatalis nanopartikel ZnO dan konsentrasi zat warna terhadap laju penyisihan zat warna ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 6. Grafik efisiensi penyisihan warna

Tabel 2. Laju penyisihan zat warna RB5 oleh proses fotokatalitik

Konsentrasi ZnO (%)	Konsentrasi zat warna RB5 (ppm = mg.L ⁻¹)	k' (menit ⁻¹)	R ²
5	5	0,0695	0,9084
5	10	0,0503	0,9497
5	15	0,0485	0,9201
10	5	0,1082	0,9670
10	10	0,2615	0,9586
10	15	0,0802	0,9342
15	5	0,0618	0,9107
15	10	0,0434	0,9676
15	15	0,0516	0,9388

Berdasarkan hasil tersebut, diketahui bahwa nilai laju penyisihan zat warna yang terbesar diperoleh pada konsentrasi ZnO 10% dan konsentrasi zat warna RB 5 10 ppm ($k' = 0,2615$). Pada $k' = 0,2615$ tersebut diperoleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9586 yang menunjukkan kesesuaian dengan model regresi linear yang digunakan.

Pada penggunaan konsentrasi fotokatalis nanopartikel ZnO 10%, laju penyisihan zat warna yang dihasilkan pada setiap variasi konsentrasi zat warna (5, 10, dan 15 ppm) lebih besar dibandingkan penggunaan konsentrasi fotokatalis ZnO 5% dan 15%. Pada konsentrasi yang lebih rendah yakni ZnO 5%, laju degradasi fotokatalitik lebih kecil dikarenakan lebih sedikitnya jumlah bagian aktif (*active site*) pada permukaan fotokatalis sehingga mempengaruhi jumlah OH• yang berperan dalam proses penyisihan warna.²⁷ Pada konsentrasi yang lebih tinggi yakni ZnO 15%, laju degradasi fotokatalitik lebih rendah dibandingkan ZnO 10% disebabkan kemungkinan adanya nanopartikel ZnO yang terimmobilisasi pada bagian dalam serat dan tidak terdistribusi secara merata pada seluruh bagian permukaan serat *hollow* sehingga mempengaruhi jumlah OH• yang terbentuk pada permukaan serat. Fotokatalis yang terimmobilisasi pada bagian luar permukaan serat akan lebih mudah terirradiasi oleh sinar UV sehingga meningkatkan efektivitas reaksi fotokatalitik. Selain itu, pada konsentrasi fotokatalis yang lebih tinggi memungkinkan terjadinya agregasi (pengumpulan) fotokatalis yang menyebabkan berkurangnya jumlah bagian aktif pada permukaan.¹⁸

KESIMPULAN

Dengan konsentrasi selulosa bakterial sebesar 2,50% dan perendaman asam selama 2 hari dihasilkan kekuatan tarik serat *hollow* SB-ZnO yang terbesar yakni 815,72 gf. Proses immobilisasi nanopartikel ZnO telah berhasil dilakukan

berdasarkan hasil FTIR yang menunjukkan keberadaan gugus fungsi ZnO.

Hasil uji penyisihan air limbah tekstil artifisial yang mengandung zat warna *Remazol Black 5* menunjukkan bahwa pH optimum proses penyisihan warna yakni pada pH 9. Pada konsentrasi RB5 10 ppm, serat *hollow* SB tanpa ZnO menghasilkan efisiensi penyisihan warna yang rendah yakni 31,20%, sedangkan serat *hollow* SB-ZnO dengan konsentrasi nanopartikel ZnO 10% berhasil mendegradasi zat warna hingga mencapai efisiensi penyisihan warna yang terbesar yakni 90,32%. Immobilisasi fotokatalis ZnO pada serat *hollow* SB terbukti berperan signifikan dalam meningkatkan efisiensi penyisihan warna. Perhitungan laju penyisihan zat warna pada proses yang optimum (yakni pada konsentrasi ZnO 10% dan konsentrasi RB5 10 ppm) menghasilkan nilai koefisien degradasi zat warna yang terbesar yaitu $k' = 0,2615$. Berdasarkan hasil karakterisasi serat dan evaluasi performa penyisihan zat warna RB5 tersebut, maka serat *hollow* SB-ZnO berpotensi untuk digunakan sebagai membran fotokatalitik pada proses pengolahan air limbah tekstil.

SARAN

Untuk membentuk serat *hollow* dengan karakteristik morfologi yang lebih baik, diperlukan kombinasi material polimer lain yang bersifat mampu meningkatkan kekakuan (*stiffness*) dan juga mempertahankan kekuatan tarik (*tensile strength*) dari material serat tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Balai Besar Tekstil yang telah mendanai penelitian ini melalui DIPA tahun 2013. Selain itu, terima kasih juga penulis sampaikan kepada bapak Sujana di Laboratorium Kimia Tekstil, Balai Besar Tekstil atas bantuannya dalam penelitian ini.

PUSTAKA

- O'Neill, C., Hawkes, L.D., Lourenco, D.N., Pinheiro, M.H. dan Delee, W. (1999). Review Colour in Textile Effluents-source, Measurement, Discharge Consents and Simulation: A Review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 74, 1009-1018.
- Sylwia, M., Antoni, W., Morawska, Masahiro, T., dan Michio, I. (2009). Application of Anatase-phase TiO₂ for Decomposition of Azo Dye in a Photocatalytic Membran Reactor. *Desalination*, 241, 97-105.
- Hoda, R.G. (2009). Enhancing of Textil Wastewater Treatment Using Different Catalysts for Advanced Oxidation Process. *Australian*

- Journal of Basic and Applied Sciences*, 3, (4), 4046-4052.
- ⁴ Maness, P.C., Sharon, S., Daniel M.B., Zheng H., Edward, J.W. dan William, A.J. (1999). Bactericidal Activity of Photocatalytic TiO₂ Reaction: Toward an Understanding of Its Killing Mechanism. *Appl Environ Microbiol.*, 65, (9), 4094-4098.
 - ⁵ Zhang, P.A. dan Sun, P.Y. (2004). Photocatalytic Killing Effect of TiO₂ Nanoparticles on Ls-174-t Human Colon Carcinoma Cells. *World J Gastroenterol*, 10, (21), 3191-3193.
 - ⁶ Zhou, G. dan Deng, J. (2007). Preparation and Photocatalytic Performance of Ag/ZnO Nanocomposites. *Material Science in Semiconductor Processing*, 10, 90-96.
 - ⁷ Peng, W., Huang, B., Xiaoyan, Q., Xiaoyang, Z., Ying, D., Jiyong, W., et al. (2008). Ag@AgCl: A Highly Efficient and Stable Photocatalyst Active Under Visible Light. *Angewandte Chemie International*, 47, 7931-7933.
 - ⁸ Kumar, V.R. dan Raza, G. (2009). Photocatalytic Disinfection of Water with Ag-TiO₂ Nanocrystalline Composite. *Ionics*, 15, 579-587.
 - ⁹ Horng, Y.R., Huang, C., Chang, C.M., Shao, H., Shiau, L.B. dan Hu, J.Y. (2009). Application of TiO₂ Photocatalytic Oxidation and Non-woven Membrane Filtration Hybrid System for Degradation of 4-chlorophenol. *Desalination*, 245, 169-182.
 - ¹⁰ Stamate, M. dan Lazar, G. (2007). Application of Titanium Dioxide Photocatalysis to Create Self-Cleaning Materials. *Romanian Technical Sciences Academy*, 3, 280-285.
 - ¹¹ Carraway, E. R., et al. (1994). Environment science technology. *Chem. Rev*, 28, 778.
 - ¹² Jang, E. S., Won, J. H., Hwang, S. J., dan Choy. (2006). Fine Tuning of the Face Orientation of ZnO Crystals to Optimize Their Photocatalytic Activity. *Advance Matter J*, 18, 3309-3312.
 - ¹³ Kuo, T. J., Lin, C. N., Kuo, C. L., dan Huan, M. H. (2007). Growth of Ultralong ZnO Nanowires on Silicon Substrates by Vapor Transport and Their Use as Recyclable Photocatalysts. *Chem. Mat. J*, 19, 5143-5147.
 - ¹⁴ Chakrabarti, S. dan Dutta, B. K. (2004). Photocatalytic Degradation of Model Textile Dyes in Wastewater Using ZnO as Semiconductor Catalyst. *Journal of Hazardous Materials*, B112, 269-278.
 - ¹⁵ Indrarti, L. dan Yudianti, R. (1994). Struktur dan Sifat Mekanik dari Lapisan Tipis Bioselulosa. *Prosiding Seminar Ilmiah P3FT-LIPI*.
 - ¹⁶ Sugara, C. dan Raharja, S.R. (2009). Teknologi Alternatif Pemanfaatan Limbah Air Kelapa untuk Peningkatan Kualitas Produksi Budidaya Rumput Laut (*Eucheuma cottonii*) di Daerah Endemik Desa Patas, Kecamatan Gerokgak, Buleleng, Bali. Laporan Penelitian, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Brawijaya, Malang.
 - ¹⁷ Gustiani, S. dan Eriningsih, R. (2009). Proses Daur Ulang Limbah Cair Tekstil Menggunakan Proses Membran Selulosa Bakterial dari Limbah Tahu. Laporan Penelitian, Balai Besar Tekstil.
 - ¹⁸ Kertes, S., Cakl, J., dan Jirankova, H. (2014). Submerged Hollow Fiber Microfiltration as a Part of Hybrid Photocatalytic Process for Dye Waste Water Treatment. *Desalination*, 343, 106-112.
 - ¹⁹ ASTM. (2002). Standard Test Methods for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. Method D 882-02 *Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials*.
 - ²⁰ Doh, S.J., Kim, C., Lee, S.G., Lee, S.J., dan Kim, H. (2008). Development of photocatalytic TiO₂ nanofibers by electrospinning and its application to degradation of dye pollutants. *Journal of Hazardous Materials*, 154, 118-127.
 - ²¹ Piluharto, B. (2008). Kajian Sifat Fisik Film Tipis Nata de Coco sebagai Membran Ultrafiltrasi. *Jurnal Ilmu Dasar*, 4, (1), 52-57.
 - ²² Lindu, M., Puspitasari, T. dan Ismi, E. (2010). Sintesis dan Karakterisasi Selulosa Asetat dari Nata de Coco sebagai Bahan Baku Membran Ultrafiltrasi. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 12, (1), 17-23.
 - ²³ Singh, A., Kumar, R., Malhotra, N., dan Suman. (2012). Preparation of ZnO nanoparticles by solvothermal process. *International Journal for Science and Emerging Technologies with Latest Trends*, 4, (1), 49-53.
 - ²⁴ Gouvea, Carlos, A. K., Wypych, F., Moraes, S. G., Duran, N., Nagata, N., et al. (2000). Semiconductor-assisted Photocatalytic Degradation of Reactive Dyes in Aqueous Solution. *Chemosphere*, 40, 433-440.
 - ²⁵ Wang, H., C., Xie., W., Zhang, S., Cai, Z., Yang, dan Y., Gui. (2007). Comparison of Dye Degradation Efficiency using ZnO Powders with Various Size Scales. *Journal of Hazardous Material*. 141, 645-652.
 - ²⁶ Kasuma, Y. N. (2012). Penggunaan Komposit ZnO-CuO yang Disintesis secara Sonochemistry yang Digunakan sebagai Katalis untuk Fotodegradasi Metil Orange dan Zat Antibakteri, Tesis, Program Studi Kimia, Universitas Andalas.
 - ²⁷ Rauf, M. A. dan Ashraf, S. Salman. (2009). Fundamental principles and application of heterogeneous photocatalytic degradation of dyes in solution. *Chemical Engineering Journal*, 151, 10-18.