

PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI SELULOSA MIKROFIBRIL DARI SERAT IJUK DENGAN PERLAKUAN KIMIA ALKALI DAN OKSIDASI PEROKSIDA

J.H. Mustafa^a, E. Yuanita^{a,b*}, J.N. Pratama^a, M. Chalid^a

^aDepartemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok

^bBalai Besar Kimia dan Kemasan Kementerian Perindustrian

Email : evana.yuanita@gmail.com

ABSTRAK

Serat ijuk merupakan salah satu serat alam yang cukup berlimpah di Indonesia dan masih dapat ditingkatkan nilai gunanya. Kandungan selulosa yang terdapat pada serat ijuk dapat dibuat dan dimanfaatkan sebagai sumber selulosa mikrofibril. Modifikasi serat ijuk melalui perlakuan alkalinisasi dengan perendaman dalam larutan NaOH 5% selama 1 jam 30 menit telah dilakukan. Perlakuan alkalinisasi bertujuan untuk menghilangkan pengotor pada permukaan serat seperti pektin dan lilin serta menggerus lapisan lignin dan hemiselulosa. Selanjutnya serat ijuk diberi perlakuan oksidasi dengan larutan peroksida masing-masing 3% dan 6%. Perlakuan oksidasi bertujuan untuk menghilangkan lapisan pengikat antara selulosa sehingga membentuk mikrofibril. Kandungan kimia serat ijuk sebelum dan setelah perlakuan dikarakterisasi dengan FTIR. Karakterisasi morfologi permukaan serat ijuk menggunakan FE-SEM. Kristalinitas serat ijuk diketahui dengan pengujian XRD. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa terdapat perubahan kandungan kimia, morfologi permukaan serat ijuk, dan kristalinitas serat ijuk setelah mendapatkan perlakuan alkali dan oksidasi.

Kata kunci : serat ijuk, alkalinisasi, oksidasi, selulosa mikrofibril

ABSTRACT

Arengapinnata (ijuk) fibre is one of the most abundant fibre in Indonesia and its value added still can be improved. Cellulose that contained inside the ijuk fibre can be used as the source of microfibrillated cellulose. The modification of ijuk fibre by alkalinisation in the aqueous NaOH 5% was conducted. Alkalinisation treatment was conducted to remove the impurities such as pectin and wax on the fibre surfaces. Alkalinisation also meant to grind the lignin and hemicellulose layer. After that, the ijuk fibre was given oxidation treatment by hydrogen peroxide 3 or 6%. Oxidation process aims to remove the binder layer among cellulose thus the fibre can formed micro fibril. Chemical content of the ijuk fibre for both the untreated and treated were analysed by FTIR. Morphological characterisation ijuk fibre was conducted by FE-SEM, and crystallinity index of the fibre was known by XRD analysis. The results show lots of differences in chemical content, morphology, and crystallinity among the untreated and the treated fibre after treated by alkali and oxidation process.

Keywords : Arengapinnata fibre, alkalinisation, oxidation, microfibril cellulose

PENDAHULUAN

Serat ijuk adalah salah satu serat yang penting dan memiliki nilai keekonomisan tinggi di Indonesia, bersama-sama dengan serat kenaf, tebu, kelapa, jerami, serta bambu.

Serat ijuk merupakan suatu material komposit alam, yang merupakan fibril dari selulosa dan diselubungi oleh pektin, hemiselulosa, serta lignin. Selaput lignin serta hemiselulosa bersifat amorfus, sementara fibril selulosa bersifat semi kristalin. Selulosa yang semi kristalin ini dapat dimanfaatkan sebagai agen nukleasi pada polimer jika memiliki nilai indeks kristalinitas tinggi. Hanya saja penggunaan serat ijuk selama ini masih belum memiliki nilai tambah, seperti sapu ijuk ataupun keset kaki. Sementara, serat ini memiliki densitas yang rendah ($1,29 \text{ g/cm}^3$), harga yang rendah, melimpah di alam, serta pemrosesan yang relative mudah sehingga memungkinkan untuk memberikan nilai tambah pada serat ini [1,2].

Selulosa merupakan rantai polimer lurus dengan ikatan β -(1 \rightarrow 4) pada unit D-glukopiranosil dan memiliki rumus molekul $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_5$. Polimer ini merupakan material alam terbarukan terbanyak di bumi. Selulosa memiliki ikatan intra dan intermolecular yang kuat, sehingga yang memiliki sifat kristalin, higroskopik dan modulus yang tinggi. Kandungan selulosa pada serat tanaman cukup tinggi, yaitu berkisar antara 65-70% [3]. Selulosa merupakan bahan pengisi utama dengan sifat semi kristalin linear (memiliki batas yang jelas antara daerah kristalin dengan amorfus) yang menentukan sifat mekanik dari serat pada tanaman.

Selulosa dapat diubah menjadi beberap abentuk, antara lain selulosa mikrokristalin (MCC) yang merupakan pulp kayu olahan dan biasa digunakan sebagai suplemen vitamin. Selulosa mikrokristalin juga digunakan sebagai *plaque assay* untuk analisis virus, sebagai alternative dari karboksi metal selulosa [1,4]. Sementara bentuk lainnya adalah selulosa mikrofibril (MFC). Selulosa ini memiliki aspek rasio antara panjang dengan diameter yang tinggi. Dibandingkan dengan MCC, pembuatan selulosa MFC membutuhkan energi yang lebih sedikit. Karena bentuknya yang berupa fibril dan memiliki banyak ikatan hidrogen yang membentuk struktur Kristal tigadimensi, MFC memiliki keunggulan atas kristalinitasnya. Perilaku *shear-thinning* dari MFC membuat MFC berguna sebagai penstabil emulsi dan surfaktan. Potensi menunjukkan kemampuan MFC sebagai aditif penguat dengan kekuatan tarik lebih tinggi daripada Kevlar [5].

Perlakuan pada serat alam dengan natrium hidroksida (NaOH) banyak digunakan untuk memodifikasi strukturmolekul selulosa dan serat pada umumnya. Dilaporkan bahwa selaput hemiselulosa, lignin, pektin, dan lilin terlepas dari serat sehingga permukaan menjadi bersih. Riset lain melaporkan bahwa efek dari perlakuan alkali serat kenaf menggunakan larutan natrium hidroksida dapat membersihkan lapisan serat. Sementara reaksi pemutihan yang dilakukan oleh Pakanita Muensri dkk menunjukkan bahwa pemutihan menggunakan NaClO menghasilkan serat sabut kelapa yang bersih dari lignin pada permukaan [6]. Serat yang dihasilkan juga menjadi halus dan mengalami reduksi diameter menjadi $67,6 \mu\text{m}$. Riset lain menunjukkan bahwa reaksi pemutihan karbometilasi serat selulosa katun dengan menggunakan hydrogen peroksida di bawah suasana basa mampu menghasilkan produk dengan kegunaan dan durabilitastinggi. Disebutkan juga bahwa serat yang diberi perlakuan pemutihan hydrogen peroksid amemiliki tingkat keputihan yang tinggi Karena efek destruktif dari konsentrasi tinggi H_2O_2 [7].

Studi ini ingin melihat apakah serat ijuk dapat diberi perlakuan pembersihan alkali dan pemutihan seperti yang telah dilakukan sebelumnya pada serat-serat lain. Studi ini

melakukan pengamatan terhadap efek alkalinisasi dan pemutihan terhadap proses fibrilasi untuk mendapatkan MFC dari serat ijuk. Parameter yang digunakan adalah morfologi dari serat yang digambarkan oleh FE-SEM, spektra FTIR untuk mengetahui gugus yang terkandung pada serat, serta difraksi sinar-X (XRD) untuk mengetahui kristalinitas serat.

METODOLOGI

Material yang digunakan meliputi serat ijuk yang dibeli dari supplier di Ciputat, Tangerang. Serat ijuk berdiameter antara 75-90 μm dengan adanya pori-pori di permukaan serat berdiameter sekitar 10-15 μm . Ijuk dibersihkan menggunakan air sebelum diberi perlakuan lebih lanjut. Bahan kimia natrium hidroksida (NaOH) *pure analyte* didapatkan dari Merck. Untuk proses oksidasi digunakan hidrogen peroksida (H_2O_2) teknis.

Untuk proses alkalinisasi digunakan larutan 5% *weight/volume* NaOH. Saat proses perlakuan alkalinisasi, digunakan rasio antara volume ijuk dengan volume larutan sebesar 1:50. Hal ini dilakukan karena rasio volume yang lebih kecil tidak sanggup membuat ijuk terbenam dengan sempurna.

5 gram serat ijuk yang telah dicuci menggunakan akuades dibenamkan dalam 100 mL 5% *w/v* NaOH (1,25 M) dan suhu 80 °C. Ijuk diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama 1,5 jam, diangkat, dan diulangi sebanyak 2 kali. Setelah itu, ijuk dipisahkan dari larutan, kemudian dicuci menggunakan akuades hingga pH mencapai 7 (netral).

Serat ijuk yang telah diberi perlakuan alkalinisasi tersebut selanjutnya diberi perlakuan lanjutan yaitu oksidasi. Ijuk dibenamkan dalam larutan hidrogen peroksida, masing-masing konsentrasi 3% dan 6% *w/v* H_2O_2 (0,88 dan 1,76 M) dengan suhu 70 °C. Kemudian serat ijuk diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama 1,5 jam. Setiap selang waktu 15 menit larutan ditetesi buffer NaOH karena reaksi terjadi maksimum dalam suasana basa. Serat kemudian dipisahkan dari larutan hidrogen peroksida, kemudian dicuci menggunakan akuades hingga pH netral. Setelah itu serat didiamkan pada suhu kamar selama satu malam.

Karakterisasi morfologi dari serat belum diberi perlakuan dan serat yang telah diberi perlakuan menggunakan citra dari *field emission scanning electron microscope* (FE-SEM) JEOL JSM 6360LA dengan beda potensial 20kV. Sampel dilapisi dengan lapisan platinum konduktif tipis untuk menghindari adanya konsentrasi muatan pada material. Pelapisan menggunakan vakum JEOL JFC 1600 Auto Fine Coater. Perbesaran yang dilakukan sebesar 5000x.

Fourier transform infrared (FTIR) spektroskopi dilakukan untuk mengidentifikasi konstituen serat ijuk secara kuantitatif. Serat dikeringkan, dihancurkan hingga menjadi partikel halus, dikompresi, kemudian dianalisis dengan menggunakan Perkin-Elmer FTIR Spectrometer. Instrumen FT-IR memungkinkan pengujian tanpa persiapan menggunakan KBr. Serat ijuk belum diberi perlakuan, serat diberi perlakuan NaOH, dan serat diberi perlakuan NaOH dan H_2O_2 diuji menggunakan FTIR. Setiap variabel sampel dipindai sebanyak 30 kali dengan rentang bilangan gelombang pemindaian antara 400 hingga 4000 cm^{-1} .

Difraksi sinar-X (XRD) digunakan untuk menganalisis kristalinitas dari serat ijuk setelah diberikan berbagai perlakuan. Material dihaluskan menjadi serbuk halus, ditempatkan pada wadah, kemudian diuji menggunakan XRD Cu-K α . Untuk menghitung indeks kristalinitas (*CrI*) dari selulosa, digunakan metode perhitungan puncak kristalinitas [8,9]. Metode ini dikembangkan oleh Segal dan kawan-kawan untuk menganalisis spektra XRD saat dekrystalisasi selulosa katun yang telah diberi perlakuan kimia dan mekanis. Segal mendapatkan bahwa area kristalin berada di kisi (002), dengan $2\theta \approx 21,5^\circ$. Sementara area amorfus berada di antara kisi (002) dengan (101), di mana kisi (101) berada di nilai $2\theta \approx 15^\circ$. Nilai indeks kristalinitas didapat dari rasio antara puncak kristalin ($I_{002} - I_{am}$) dengan total intensitas (I_{002}) dari spektra XRD setelah dilakukan dekonvolusi.

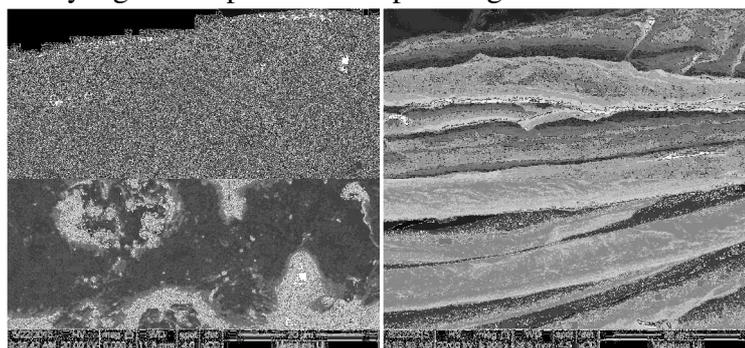
$$CrI = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} * 100\%$$

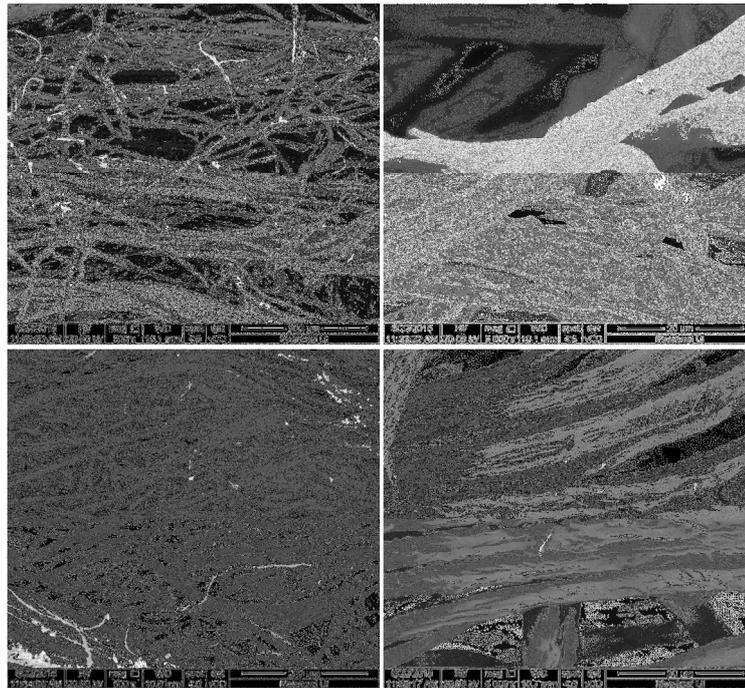
di mana I_{cr} adalah intensitas hamburan area kristalin dan I_{am} adalah intensitas hamburan amorfus. Intensitas hamburan kristalin terletak pada kisi (002) dan memiliki sudut difraksi $2\theta = 22^\circ$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Serat ijuk sebelum diberi perlakuan memiliki diameter 75-90 μm dan diliputi dengan lignin, lilin (*wax*), pektin, debu, serta pengotor organik maupun inorganik lain seperti tanah ataupun mineral. Pembersihan biasa dengan menggunakan air tidak mampu menghilangkan pengotor-pengotor tersebut.

Pasca perlakuan alkalinisasi dengan 5% NaOH, terlihat hilangnya lapisan luar berpori pada ijuk. Pada metoda ini, didapatkan bahwa alkalinisasi mampu menghilangkan lapisan lilin, dan serat telah menunjukkan keberadaan fibrilmikro. Diameter juga menurun hingga hanya di kisaran 8 μm . Pada karakterisasi menggunakan spektra infra merah terkonfirmasi bahwa yang terkelupas adalah lapisan lignin.





Gambar 1. Citra FE-SEM pada serat ijuk (a) tanpa perlakuan; (b) dengan perlakuan alkalinisasi NaOH 5%; (c) perlakuan alkalinisasi + oksidasi H₂O₂ 3% perbesaran 500x; (d) perlakuan alkalinisasi + oksidasi H₂O₂ 3% perbesaran 5000x; (e) perlakuan alkalinisasi + oksidasi H₂O₂ 6% perbesaran 500x; (f) perlakuan alkalinisasi + oksidasi H₂O₂ 6% perbesaran 5000x

Serat ijuk yang telah diberi perlakuan alkalinisasi dan oksidasi menggunakan hydrogen peroksida menunjukkan karakteristik yang lebih kasar daripada yang hanya diberi perlakuan alkalinisasi saja. Terlihat pula bahwa hemiselulosa mulai rusak. Diameter fibril juga menurun menjadi di kisaran 6 μm .

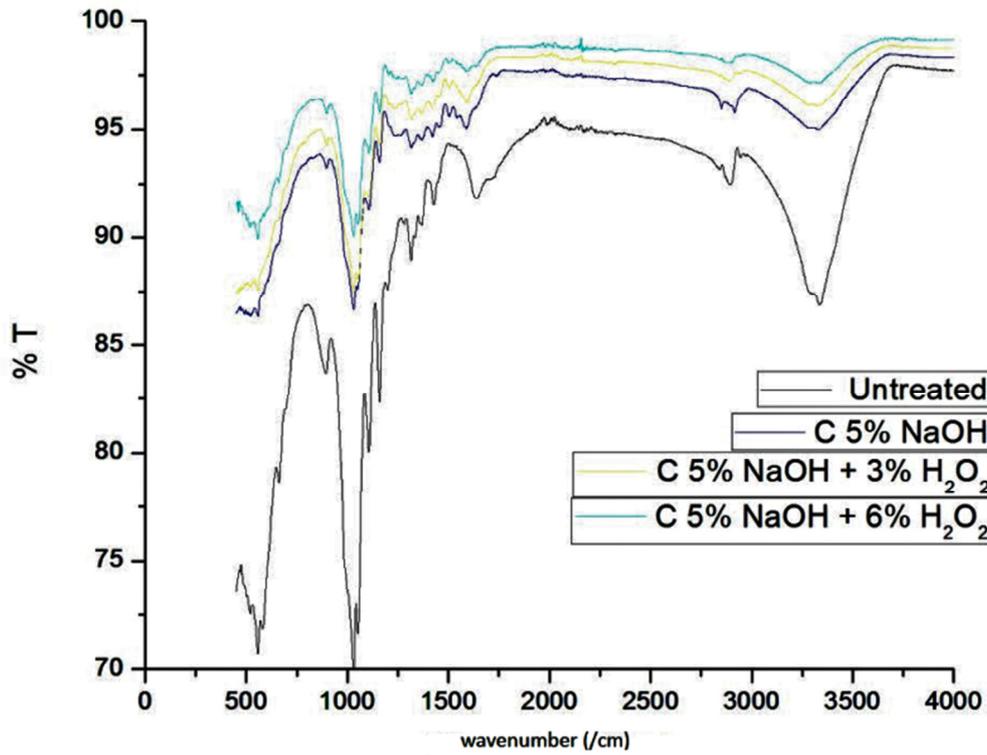
Secara umum, terlihat bahwa morfologi serat setelah diberi perlakuan kimiawi lebih bersih dan menunjukkan mikrofibril ketimbang serat tanpa perlakuan. Terlihat mikrofibril selulosa mulai nampak setelah proses alkalinisasi, yang menunjukkan keberhasilan proses peluruhan kulit serat seperti hemiselulosa, lignin, serta pektin. Sementara itu, proses oksidasi membuat penurunan diameter serat dan membuat serat menjadi lebih bersih.

Pada morfologi serat setelah perlakuan oksidasi, terlihat adanya butir-butir putih sementara pada citra SEM serat tanpa perlakuan oksidasi tidak menunjukkan penampakan tersebut. Butir putih tersebut merupakan produk sampingan reaksi oksidasi asam lemak oleh reagen H₂O₂ [10]. Pada keperluan industri, reagen harus rutin diganti karena produk sampingan ini dapat membentuk *pitch* pada serat.

Pada pengamatan morfologi dari citra SEM didapatkan indikasi bahwa adanya lapisan lilin yang hilang dan adanya lignin yang terkelupas.

Dari pengamatan spektra FTIR, untuk material yang belum diberi perlakuan terdapat data rendahnya intensitas puncak nomor gelombang (*wave number*) 895 hingga 1060 cm^{-1} , yakni 72,27%. Nomor gelombang tersebut menandakan adanya ikatan kimia C-O-C *pyranose* yang menandakan adanya selulosa. Sementara untuk serat yang diberi

perlakuan alkalinisasi, oksidasi 3%, serta oksidasi 6% berturut-turut menunjukkan tren peningkatan intensitas puncak. Dengan mencocokkan spektra FTIR selulosa pada *database* spektra FTIR, diketahui bahwa tren peningkatan intensitas puncak ini semakin menunjukkan peningkatan kemurnian dari serat.



Gambar 2. Spektra FTIR serat ijuk. Spektra (a) serat belum diberi perlakuan (b) serat diberi perlakuan NaOH 5% (c) serat diberi perlakuan NaOH dan 3% H_2O_2 (d) serat diberi perlakuan NaOH dan 6% H_2O_2

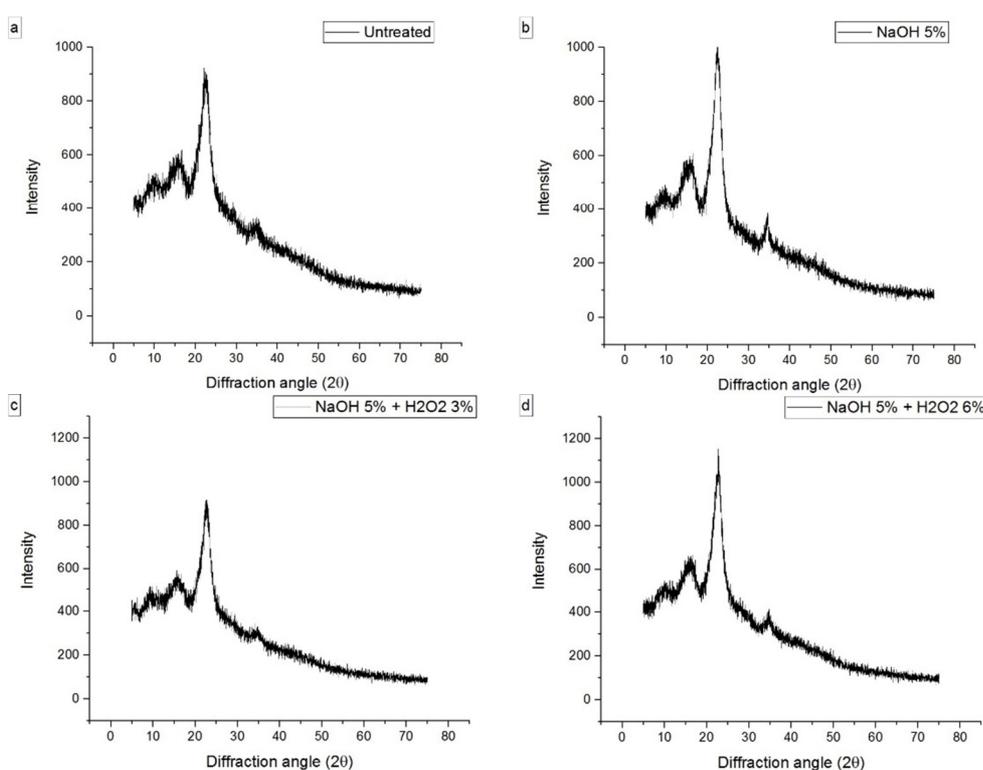
Sementara itu puncak antara 1043 hingga 1135 cm^{-1} yang menunjukkan ikatan aromatic dari guaiacyl dan syringyl menandakan keberadaan lignin. Dari kurva dapat terlihat transmittansi spectra pada nomor gelombang tersebut akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya perlakuan pada serat, terutama setelah diperlakukan 6% H_2O_2 . Peningkatan transmittansi menunjukkan penurunan gugus lignin pada serat yang telah diberi perlakuan.

Untuk nomor gelombang 1247 cm^{-1} merupakan penanda dari keberadaan ikatan C-O grup aryl pada lignin. Sementara 1238 cm^{-1} merupakan vibrasi dari ikatan C-O dari eter, ester, dan gugus fenol karena adanya lilin pada lapisan epidermis. Hilangnya pita ini pada ijuk yang telah diberi perlakuan menandakan adanya penghilangan lilin pada epidermis [11]. Sementara antara nomor gelombang 1653 dan 1736 cm^{-1} , menunjukkan peregangan ikatan C=O dari kelompok asetil dan ester uranic dari hemiselulosa; atau ester dari gugus karboksilat dalam asam ferulat dan p-coumaric lignin dan/atau hemiselulosa. Pada spektra ini, memiliki pola yang mirip seperti sebelumnya yakni menunjukkan peningkatan transmittansi gelombang pada serat yang telah diberi perlakuan kimia.

Terlihat bahwa perlakuan alkalinisasi dan perlakuan pemutihan dengan H_2O_2 6% didapatkan selulosa dengan kemurnian tinggi dan bebas dari lapisan lilin, lignin, dan

pengotor lain. Hanya saja seperti ditunjukkan pada citra FE-SEM, serat dengan perlakuan oksidasi memiliki bulir-bulir putih yang merupakan produk sampingan dari reaksi oksidasi. Jika bulir putih ini dapat dibersihkan dari serat selulosa, kemurnian selulosa akan meningkat.

Karakterisasi XRD menunjukkan serat ijuk mentah belum diberi perlakuan telah memiliki kristalinitas yang cukup tinggi. Pada Gambar terlihat bahwa muncul tiga puncak pada 2θ 16, 22,5 serta 28° yang masing-masing merupakan kisi (101) dan (002). Untuk nilai $2\theta = 28^\circ$ merupakan puncak baru yang kemunculannya tidak terlalu signifikan, perlu dianalisis selanjutnya. Pada nilai $2\theta = 16$ dan $2\theta = 22,5$ masing-masing memiliki intensitas 604 serta 924. Untuk nilai amorfus didapat di lembah antara kisi 002 dan 101 dengan nilai intensitas 438. Perhitungan indeks kristalinitas menunjukkan bahwa untuk serat tanpa perlakuan memiliki indeks kristalinitas 37%.



Temuan baru menunjukkan bahwa pada serat diberi perlakuan NaOH 5% memiliki puncak yang semakin tinggi pada nilai $2\theta \approx 22$. Sementara itu untuk kisi (002) dan amorfus masing-masing berada di nilai $2\theta = 22,62$ dan $2\theta = 18,84$ dengan intensitas masing-masing 386 dan 1036. Indeks kristalinitas berada di angka 63%.

Sementara untuk serat dengan serat diberi perlakuan NaOH 5% dan H_2O_2 3% menunjukkan puncak kisi 002 yang menurun, yakni hanya 916 dengan nilai intensitas amorfus sebesar 402. Indeks kristalinitas tercatat sebesar 56%. Untuk serat dengan perlakuan NaOH 5% dan H_2O_2 6%, didapatkan puncak kisi (002) meningkat ke angka 1152, dengan intensitas amorfus sebesar 454. Indeks kristalinitas untuk serat ini sebesar 70%, atau merupakan serat dengan kristalinitas tertinggi dari seluruh perlakuan.

Secara keseluruhan, proses alkalinisasi menggunakan NaOH menunjukkan peningkatan kristalinitas yang tinggi. Hal ini terjadi karena proses alkalinisasi mampu meluruhkan lapisan lilin pada permukaan, sehingga didapatkan serat mikrofibril selulosa dengan kristalinitas tinggi. Sementara itu proses oksidasi dengan menggunakan H₂O₂ teraktivasi dapat menurunkan pengotor berbentuk lemak maupun lignin yang belum dapat dibersihkan secara maksimal oleh reagen alkali. Hingga pada akhirnya didapatkan kristalinitas yang lebih tinggi pada serat yang telah diberi perlakuan alkali dan oksidasi. Hanya saja asam lemak atau produk hasil oksidasi dapat terakumulasi pada filtrat. Pada keperluan industri, filtrat harus rutin difiltrasi karena produk hasil oksidasi dapat membentuk *pitch* pada serat [10].

KESIMPULAN

Perlakuan kimiawi alkalinisasi pada serat ijuk diketahui dapat meluruhkan lapisan luar serat alam seperti pektin, hemiselulosa, serta lignin sehingga dapat didapatkan mikrofibril selulosa. Perlakuan kimiawi pemutihan dengan menggunakan hydrogen peroksida dapat meningkatkan kristalinitas dari serat, diketahui dari spectra XRD yang didapat. Hanya saja perlakuan pemutihan menggunakan hydrogen peroksida memunculkan hasil sampingan berupa pengotor dengan produk oksidasi dengan asam lemak. Pengotor ini ditemukan pada seluruh serat alam hasil perlakuan oksidasi. Pengotor hasil oksidasi ini dapat mempengaruhi kemurnian serat alam, serta pada skala produksi massal dapat membentuk *pitch* yang tidak diinginkan pada serat.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Indonesia beserta Kementerian Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia atas dukungan terhadap riset ini melalui hibah penelitian pascasarjana.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Bachtiar, S. M. Sapuan, E. S. Zainudin, A. Khalina, K.Z.M. Dahlan. The tensile properties of single sugar palm (Arengapinnata) fibre. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 11* (2010)
- [2] MochamadChalid, Imam Prabowo. The effect of alkalization to the mechanical properties of the ijuk fiber reinforced PLA biocomposites. *International Journal of Chemical, Nuclear, Material and Metallurgical Engineering 2015;9(2)* p.342-346.
- [3] Mikhail Matrosovich, Tatyana Matrosovich, Wolfgang Garten, Hans-Dieter Klenk. New low-viscosity overlay medium for viral plaque assays. *Virology Journal (BioMed Central)2006; 3:63.*
- [4] Abdelmouleh M, Boufi S, Belgacem MN, Duarte AP, Salah AB, Gandini A. Modification of cellulosic fibres with functionalized silanes: development of surface properties. *Int J of Adhesion and Adhesives2004;24(1):43-54*

- [5] Lavoine, N., Desloges, I., Dufresne, A., Bras, J. Microfibrillated cellulose – Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review. *Carbohydrate Polymers* 2012 90(2):735-764
- [6] Muensri, P., Kunanopparat, T., Menut, P., Siriwattanayotin, S. Effect of lignin removal on the properties of coconut coir fiber/wheat gluten biocomposite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2011 42(2):173-179
- [7] Simone ML Rosa, Noor Rehman, Maria Inez G de Miranda, Sonia MB Nachtigall, Clara ID Bica. Chlorine-free extraction of cellulose from rice husk and whisker isolation. *Carbohydrate Polymers* 2011, 87: 1131-1138
- [8] Segal, L., Creely, J.J., Martin, A.E., Conrad, C.M. An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. *Textile Research Journal* 1959, 29(10):786-794
- [9] Sunky Park, John O Baker, Michael E Himmel, Philip A Parilla, David K Johnson. Cellulose crystallinity index: measurement techniques and their impact on interpreting cellulose performance. *Biotechnology for Biofuels* 2010, 3:10
- [10] Carmen SR Freire, Armando JD Silvestre, Carlos Pascoal Neto, Dmitry V Evtuguin. Effect of oxygen, ozone and hydrogen peroxide bleaching stages on the contents and composition of extractives of *Eucalyptus globulus* kraft pulps. *Bioresource Technology* 2006, 97: 420-428
- [11] Herrera-Franco, P.J., Valadez-Gonzalez, A. A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering* 2005, 36(8):597-608