

# Sintesis dan Karakterisasi Mikrokrystal Selulosa dari Eceng Gondok dengan Hidrolisis Asam Sulfat

Tri Surya Febriyani<sup>1,2</sup>, Azza Nabila Rahmadhani<sup>1,2</sup>, Suprihatin<sup>1,2</sup>, Sani<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

<sup>2</sup>Laboratorium Material Maju, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

\*Koresponden email: suprihatin.tk@upnjatim.ac.id

Diterima: 24 April 2026

Disetujui: 29 April 2026

## Abstract

Water hyacinth has great potential as a raw material for Microcrystalline Cellulose (MCC) because its cellulose content reaches 60.29%. The objective of this study was to produce MCC that meets the standards of the Handbook of Pharmaceutical Excipients through the stages of  $\alpha$ -cellulose isolation and hydrolysis with 1.5 M sulfuric acid at 80°C. The isolation process yielded an  $\alpha$ -cellulose content of 43.61%, while the best hydrolysis conditions were achieved at a solvent volume of 100 mL for 40 minutes. The resulting MCC product was a light cream-colored powder, insoluble in water, with a moisture content of 0.24%, a density of 0.8245 g/cm<sup>3</sup>, and a pH of 7.31. Morphological analysis via SEM revealed rod-shaped and elongated flat forms with agglomeration in some areas. XRD results confirmed the formation of cellulose II crystals with characteristic peaks at 11.83°, 12.26°, 20.04°, 21.76°, and 34.53°. Based on quantitative analysis, the degree of crystallinity was 68.0870%, the degree of amorphism was 31.9130%, and the average crystal size was 7.22 nm, indicating a stable product structure.

**Keywords:** *water hyacinth, sulfuric acid, acid hydrolysis,  $\alpha$ -cellulose, microcrystalline cellulose*

## Abstrak

Eceng Gondok memiliki potensi besar sebagai bahan baku untuk Mikrokrystal Selulosa (MCC) karena kandungan selulosa pada tanaman ini mencapai 60,29%. Tujuan penelitian ini adalah untuk memproduksi MCC yang memenuhi standar *Handbook of Pharmaceutical Excipients* melalui tahapan isolasi  $\alpha$ -selulosa dan hidrolisis dengan asam sulfat 1,5 M pada suhu 80°C. Proses isolasi menghasilkan kandungan  $\alpha$ -selulosa sebesar 43,61%, sedangkan kondisi hidrolisis terbaik dicapai pada volume pelarut 100 mL selama 40 menit. Produk MCC yang dihasilkan berupa bubuk berwarna krem muda, tidak larut dalam air, dengan kadar air 0,24%, densitas 0,8245 g/cm<sup>3</sup>, dan pH 7,31. Analisis morfologi melalui SEM menunjukkan bentuk batang dan pipih memanjang dengan aglomerasi di beberapa area. Hasil XRD mengonfirmasi pembentukan kristal selulosa II dengan puncak karakteristik pada 11,83°, 12,26°, 20,04°, 21,76°, dan 34,53°. Berdasarkan analisis kuantitatif, derajat kristalinitas sebesar 68,0870%, derajat amorf sebesar 31,9130%, dan ukuran kristal rata-rata sebesar 7,22 nm, menunjukkan struktur produk yang stabil.

**Kata Kunci:** *eceng gondok, asam sulfat, hidrolisis asam,  $\alpha$ -selulosa, mikrokrystal selulosa*

## 1. Pendahuluan

Eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dikenal sebagai gulma air invasif dengan laju pertumbuhan vegetatif yang sangat cepat, yakni hanya 7–10 hari, sehingga sering kali menyebabkan masalah lingkungan seperti evapotranspirasi di perairan Indonesia [1] [2]. Meskipun kehadirannya tidak terkendali dengan cakupan area mencapai 154,3191 Ha pada musim hujan, tanaman ini menyimpan potensi ekonomi yang besar melalui kandungan selulosa batangnya yang mencapai 65,4% [3][4]. Sifat selulosa yang terbarukan dan memiliki ikatan hidrogen yang kuat menjadikannya prekursor potensial dalam sintesis Mikrokrystal Selulosa (MCC) [5][6].

Mikrokrystal selulosa adalah selulosa murni yang telah dihidrolisis hingga mempunyai bentuk partikel yang berukuran mikro. Karakteristik fisika dari mikrokrystal selulosa dicantumkan pada *Handbook of Pharmaceutical Excipients* yaitu mempunyai bentuk padatan serbuk, berwarna putih, ukuran partikel sebesar 20–200  $\mu$ m, densitas sebesar 1,512–1,668 g/cm<sup>3</sup>, pH sebesar 5–7,5, kadar air sebesar <5% w/w, dan tidak larut dalam air [7]. Kristalinitas mempunyai peran yang penting dalam karakteristik MCC karena akan memengaruhi kestabilan dalam pengaplikasian pada material komposit. MCC mempunyai rentang kristalinitas sebesar 55%–80%, artinya bagian kristalin lebih besar dibandingkan *amorf* sehingga struktur yang terusun secara atur lebih besar [8]. Kemudian jika ditinjau dari bentuk kristal termasuk pada bentuk selulosa II karena selulosa II terbentuk dengan perlakuan alkali atau maserasi [9] dan mempunyai *peak* yang khas yaitu 12,3°,

20,0°, dan 21,8° [10]. MCC diaplikasikan secara luas mulai dari eksipien farmasi seperti pengikat tablet, hingga penguat material komposit dan pengemas makanan [11].

Sintesis Mikrokrystal Selulosa dari biomassa memerlukan tahap delignifikasi dan bleaching untuk menghilangkan pengotor, yang dilanjutkan dengan hidrolisis asam untuk memutus ikatan amorf pada struktur selulosa [12]. Penggunaan asam sulfat ( $H_2SO_4$ ) terbukti memberikan indeks kristalinitas yang lebih baik (63,23%) dibandingkan asam klorida (HCl), meskipun memiliki kelemahan pada perolehan *yield* yang lebih rendah [13]. Selain itu, variabel waktu dan rasio pelarut sangat krusial dalam menentukan ukuran partikel akhir agar sesuai dengan standar [14]. Berdasarkan kekurangan penelitian sebelumnya pada *yield* dan karakteristik fisika, penelitian ini bertujuan untuk memperoleh MCC yang memenuhi standar *Handbook of Pharmaceutical Excipients* dengan waktu hidrolisis dan volume asam sulfat pada kondisi tertentu.

## 2. Metode Penelitian

### Bahan dan alat

Penelitian dilakukan selama empat bulan di Laboratorium Material Maju, UPN “Veteran” Jawa Timur. Sintesis mikrokrystal selulosa dilakukan dengan menggunakan metode hidrolisis asam sulfat ( $H_2SO_4$ ) untuk menghasilkan kristalinitas tinggi secara efisien. Batang eceng gondok yang diambil dari Sungai Desa Semampir di Sidoarjo digunakan sebagai bahan baku utama. Bahan kimia pendukung meliputi Aquadest (Nirwana Abadi, Surabaya),  $H_2SO_4$  98% (Queen 88, Jakarta),  $Na_2SO_3$  (Rofa Laboratorium, Bandung), serta  $H_2O_2$  50% dan NaOH (Bravo Chemical, Sidoarjo). Rangkaian alat yang dipergunakan mencakup klem, statif, termometer, *beaker glass*, dan *magnetic stirrer*.

### Prosedur Penelitian

#### Isolasi $\alpha$ -selulosa

Proses isolasi dimulai dengan tahap pretreatment yang meliputi pembersihan batang eceng gondok, pemisahan bagian-bagian tanaman, pemotongan menjadi potongan-potongan berukuran 2 cm, dan penggilingan menggunakan mesin pencacah sebelum dikeringkan pada suhu 250°C selama 2 jam. Tahap delignifikasi dilakukan dua kali, pertama menggunakan larutan NaOH 17,5% pada suhu 80°C selama 30 menit, dan kedua menggunakan larutan  $Na_2SO_3$  20% pada suhu 105°C selama 1 jam dengan setiap tahap diikuti oleh penyaringan, pencucian hingga pH netral, dan pengeringan pada suhu 130°C.

#### Bleaching

Tahap pemutihan dilakukan dengan menggunakan larutan  $H_2O_2$  2% pada suhu 60°C selama 2 jam, dilanjutkan dengan pencucian untuk menghilangkan sisa-sisa bahan hingga larutan menjadi netral, pengeringan pada suhu 130°C, dan penyimpanan dalam desikator untuk mencapai berat konstan  $\alpha$ -selulosa.

#### Hidrolisis asam

Mikrokrystal Selulosa (MCC) disintesis melalui hidrolisis 12 g  $\alpha$ -selulosa menggunakan larutan  $H_2SO_4$  1,5 M. Variasi volume larutan asam yang digunakan meliputi 100, 150, 200, 250, dan 300 mL dengan durasi pemanasan masing-masing 40, 45, 50, 55, dan 60 menit. Proses tersebut berlangsung pada suhu 80°C dengan kecepatan pengadukan 200 rpm menggunakan pengaduk magnetik. Tahap pasca hidrolisis meliputi penyaringan untuk memisahkan padatan, mencuci residu dengan aquadest hingga pH menjadi netral, dan pengeringan dalam oven pada suhu 130°C selama 1 jam. Mikrokrystal selulosa yang dihasilkan kemudian disimpan dalam desikator selama 2 menit dan ditimbang hingga mencapai berat konstan.

#### Analisa

Karakteristik mikrokrystal selulosa dilakukan analisa melalui pengujian komposisi kimia dengan metode *Chesson Data* untuk menentukan kadar selulosa, hemiselulosa, dan lignin, serta pengujian kadar  $\alpha$ -selulosa melalui ekstraksi NaOH 17,5% dan titrasi volumetri. Struktur kristalinitas, jarak antar bidang, dan ukuran kristal dianalisis menggunakan instrumen XRD (*X-Ray Diffraction*), sedangkan morfologi permukaan serta bentuk partikel diamati melalui pemindaian SEM (*Scanning Electron Microscope*). Kualitas fisik produk dipastikan melalui uji organoleptik, pengukuran pH pada rentang standar 5–7,5, dan analisis kadar air menggunakan metode susut pengeringan hingga mencapai berat konstan.

## 3. Hasil dan Pembahasan

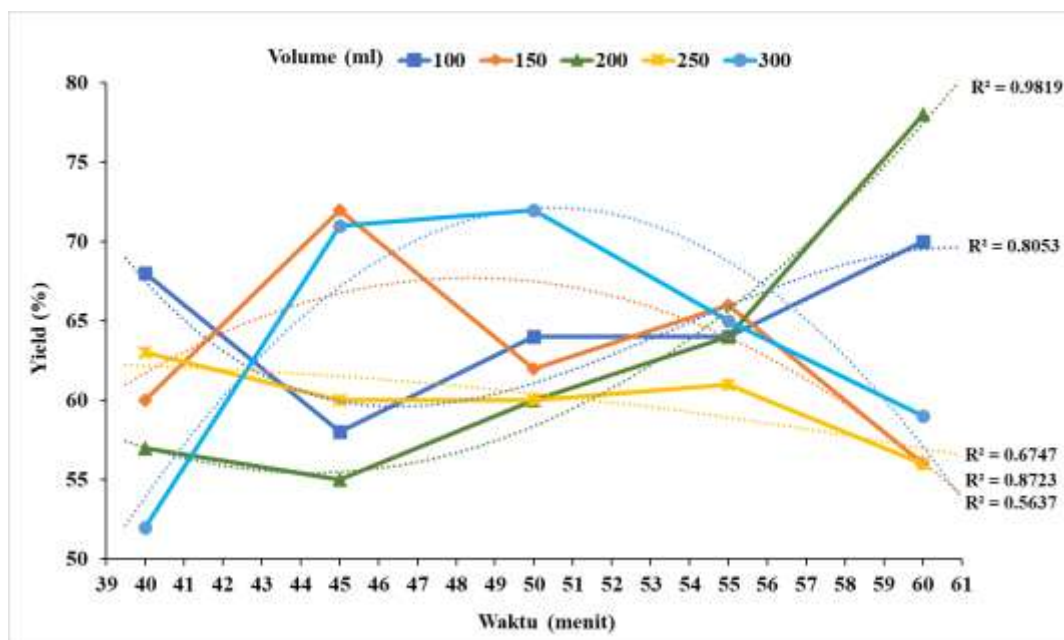
Sintesis mikrokrystal selulosa (MCC) diawali dengan isolasi  $\alpha$ -selulosa melalui proses delignifikasi dan *bleaching*.  $\alpha$ -selulosa yang diperoleh kemudian diproses lebih lanjut melalui tahap hidrolisis menggunakan asam sulfat. Hasil dari setiap tahapan proses akan dijelaskan pada poin-poin berikut :

### Isolasi $\alpha$ -selulosa

Bahan baku dianalisis kandungan lignoselulosa menggunakan metode *chesson data* di Lab Gizi, Unair yang menghasilkan kadar selulosa sebesar 60,29%, Hemiselulosa 12,66%, dan Lignin sebesar 4,04%. Kandungan selulosa batang eceng gondok sebesar 60,29% akan dipergunakan untuk isolasi  $\alpha$ -selulosa dengan metode delignifikasi dan *bleaching*. Hasil delignifikasi menunjukkan bahwa kandungan lignin setelah pengujian di Lab Gizi Unair bertambah dari 4,04% menjadi 4,27%. Penambahan kadar lignin sebanyak 0,23% dipengaruhi oleh waktu delignifikasi yang lama dengan suhu tinggi. Pembentukan lignin baru diakibatkan unit fenolik yang bergabung menjadi satu dan dapat meningkatkan berat lignin pada saat pengujian [15]. Mekanisme terbentuknya, diawali dengan lignin terdegradasi menjadi monomer dan bereaksi membentuk ikatan baru dengan monomer selulosa lainnya sehingga menghasilkan lignin baru [16]. Monomer selulosa yang bereaksi dengan lignin terdegradasi mencakup selulosa murni dan hemiselulosa yang mengendap pada permukaan serat batang eceng gondok yang bersifat hidrofobik [17]. Proses *bleaching* setelah delignifikasi menunjukkan perubahan warna menjadi putih. Hidrogen peroksida akan terurai menjadi ion H<sup>+</sup> (hidrogen) dan OOH<sup>-</sup> (hidroperoksida). Ion hidroperoksida akan memutus ikatan rangkap menjadi ikatan tunggal [18]. Kemudian dilakukan analisis  $\alpha$ -selulosa di Lab Gizi Unair dan diperoleh sebesar 43,61%. Hasil rendemen dari proses isolasi  $\alpha$ -selulosa yaitu sebesar 70%.

### Hidrolisis Asam

Proses hidrolisis menggunakan larutan asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) yang menghasilkan mikrokrystal selulosa (MCC) diperoleh hasil *yield* berikut :



Gambar 1. Hasil *Yield* Mikrokrystal Selulosa

Berdasarkan **Gambar 1**, perolehan *yield* mikrokrystal selulosa menunjukkan fluktuasi yang mengindikasikan adanya titik jenuh reaksi dan potensi degradasi material. Pada volume 150 mL dan 300 mL, *yield* mencapai titik terbaik pada menit ke-45 karena penetrasi asam ke dalam bagian amorf selulosa berlangsung maksimal, namun menurun setelahnya akibat fenomena *over hydrolysis* yang mendegradasi bagian kristalin. Sementara itu, pada volume 200 mL menit ke-60, diperoleh *yield* tertinggi dengan nilai R<sup>2</sup>= 0,9819 karena volume pelarut yang lebih besar menurunkan laju degradasi melalui pengenceran konsentrasi asam. Sebaliknya, penurunan *yield* pada variasi volume lainnya dipengaruhi oleh ketidakhomogenan pengadukan serta laju degradasi yang lebih cepat pada awal reaksi, meskipun terjadi kecenderungan rekristalisasi residu pada durasi yang lebih lama.

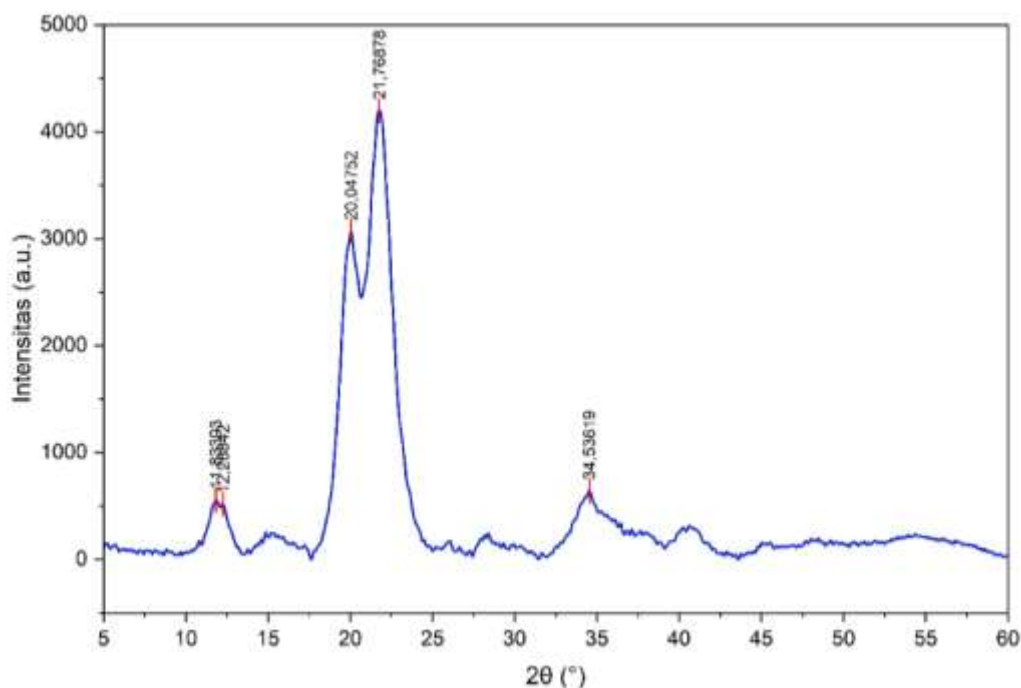
### Karakteristik Mikrokrystal Selulosa

Karakteristik Mikrokrystal Selulosa (MCC) hasil hidrolisis asam dianalisis berdasarkan parameter warna, kadar air, densitas, dan pH. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar air (0,02% – 3,83% w/w) dan nilai pH (4,02 – 7,34) telah memenuhi standar kualitas *Handbook of Pharmaceutical Excipients*. Namun, terdapat ketidaksesuaian pada karakteristik warna dan densitas. Warna krem yang muncul mengindikasikan

adanya pembentukan senyawa furfural akibat degradasi lanjut rantai selulosa selama proses hidrolisis sehingga membentuk warna yang gelap dan mudah teradsorpsi pada permukaan MCC [19], [20]. Sementara itu, nilai densitas yang lebih rendah ( $0,7096 - 0,8245 \text{ g/cm}^3$ ) tidak memenuhi standar ( $1,512 - 1,668 \text{ g/cm}^3$ ) disebabkan oleh intensitas delignifikasi yang tinggi, sehingga memicu ekspansi struktur dan volume pori selulosa [21]. Meskipun terdapat perbedaan pada densitas dan warna, kondisi operasi pada volume 100 ml dengan waktu 40 menit ditetapkan sebagai hasil terbaik. Hal ini dikarenakan parameter fungsional utamanya, yaitu pH (7,31) dan kadar air (0,24%), berada pada rentang yang sangat ideal, serta memiliki nilai densitas tertinggi di antara variasi lainnya sehingga paling mendekati karakteristik fisik MCC standar.

#### XRD (X-ray Diffraction)

Analisa XRD digunakan untuk menentukan bentuk kristal, derajat kristalinitas, dan ukuran kristal MCC. Sinar-X yang diarahkan ke sampel menghasilkan pola difraksi akibat interaksi dengan struktur kristal, yang kemudian dianalisis untuk menggambarkan keteraturan dan karakteristik kristal sampel. Berikut merupakan grafik yang dihasilkan dari analisa XRD :



**Gambar 2.** Hasil Uji XRD pada Volume 100 ml dengan Waktu Hidrolisis 40 Menit

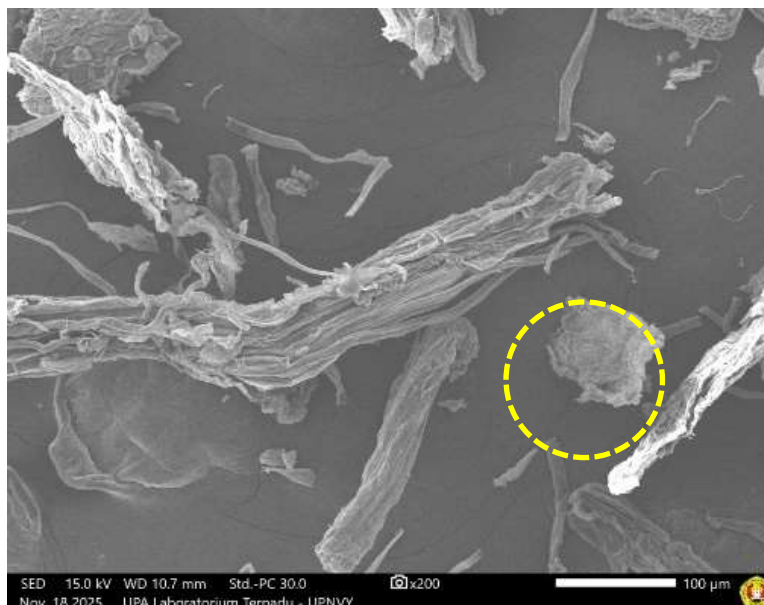
Berdasarkan **Gambar 2** hasil uji XRD mikrokristal selulosa dari eceng gondok menunjukkan puncak kristal pada  $2\theta$  yaitu  $11,83^\circ$ ,  $12,26^\circ$ ,  $20,04^\circ$ ,  $21,76^\circ$ , dan  $34,53^\circ$  yang mengindikasikan fasa kristalin, puncak tajam berada pada  $20,04^\circ$  dan  $21,76^\circ$ . Derajat pada grafik XRD dapat menunjukkan bentuk kristal (*polimorf*), selulosa memiliki 4 *polimorf*, yakni selulosa I, II, III, dan IV [22]. Berdasarkan derajat yang dihasilkan menunjukkan bahwa MCC yang terbentuk masuk dalam *polimorf* selulosa II. Hal ini dikarenakan adanya derajat puncak ganda yang khas di  $20,04^\circ$  dan  $21,76^\circ$ , diperkuat dengan literatur yang menunjukkan bahwa karakteristik selulosa II pada MCC berada pada puncak  $12,3^\circ$ ,  $20,0^\circ$ , dan  $21,8^\circ$ . Sedangkan, karakteristik selulosa I berada pada puncak  $14,7^\circ$ ,  $16,8^\circ$ , dan  $20,5^\circ$  [10]. Selulosa II memiliki rantai antiparalel, sehingga memiliki stabilitas yang tinggi karena memiliki lebih banyak ikatan hidrogen yang mengunci menyebabkan susunan menjadi kompak [23].

Analisis derajat kristalinitas dilakukan untuk mengetahui perbandingan antara struktur selulosa yang teratur (kristalin) dan yang tidak teratur (*amorf*). Menggunakan bantuan *Software Origin Lab*, diperoleh nilai derajat kristalinitas sebesar 68,087%. Hasil ini menunjukkan bahwa MCC didominasi oleh fase kristalin dibandingkan fase amorf sebesar 31,913%, yang telah sesuai dengan rentang standar MCC yaitu 55% – 80%. Tingginya nilai kristalinitas ini menunjukkan adanya penataan ulang molekul selulosa yang membuat strukturnya lebih stabil saat diaplikasikan dalam material komposit [8]. Kemudian analisis ukuran kristal menunjukkan rata-rata sebesar 7,22 nm, lebih besar dibandingkan MCC komersial yang umumnya berukuran 3,94 nm. Ukuran kristal yang lebih besar membuat luas permukaan yang lebih besar sehingga asam kuat

menembus daerah *amorf* secara lebih efektif untuk memutus ikatan glikosidik, dan menghasilkan proses hidrolisis yang optimal [24].

#### SEM (Scanning Electron Microscope)

Berdasarkan hasil identifikasi karakteristik Mikrokrystal Selulosa (MCC), diperoleh hasil analisa morfologi sebagai berikut :



**Gambar 3.** Morfologi dan Permukaan MCC Pembesaran 200x

Berdasarkan **Gambar 3** menunjukkan bahwa partikel MCC memiliki morfologi yang heterogen dengan bentuk yang tidak seragam. Struktur partikel didominasi oleh bentuk batang disertai *rod-shaped*, pipih memanjang, serta adanya fenomena aglomerasi di beberapa bagian. Keberagaman bentuk menunjukkan bahwa proses hidrolisis asam terhadap serat selulosa belum berlangsung secara sempurna di seluruh bagian sampel [25]. Penggunaan larutan asam yang mendegradasi bagian amorf selulosa sehingga kristalin individu terlepas dan membentuk tekstur permukaan yang kasar dan tidak rata. Adapun munculnya aglomerasi pada **Gambar 3** disebabkan oleh ikatan antara kristal individu yang terbentuk selama proses pengeringan akhir yang mengakibatkan partikel cenderung saling menempel dan membentuk ukuran yang lebih besar [26]. Hasil analisis kuantitatif menggunakan *ImageJ* menunjukkan bahwa produk MCC dari eceng gondok memiliki panjang rata-rata (L) sebesar  $84,270 \pm 18,105 \mu\text{m}$  dan berada dalam rentang ukuran MCC standar pada *Handbook of Pharmaceutical Excipient* yang memiliki ukuran rata-rata sekitar 20 – 200  $\mu\text{m}$ .

#### 4. Kesimpulan

Sintesis Mikrokrystal Selulosa (MCC) menghasilkan fase bubuk padat berwarna krem akibat degradasi menjadi senyawa furfural selama proses pemanasan. Nilai densitas yang diperoleh sebesar  $0,7096\text{--}0,8245 \text{ g/cm}^3$  tidak memenuhi standar akibat perluasan struktur pori pasca-delignifikasi. Namun, parameter kadar air ( $0,02\%\text{--}3,83\% \text{ w/w}$ ) dan pH ( $4,02\text{--}7,34$ ) memenuhi standar kualitas *Handbook of Pharmaceutical Excipient*. Kondisi operasi terbaik ditemukan pada volume hidrolisis 100 mL dengan durasi 40 menit, menghasilkan *yield* 68%. Karakteristik MCC dalam kondisi terbaik ini menunjukkan warna krem muda, densitas  $0,8245 \text{ g/cm}^3$ , kadar air 0,24%, dan pH 7,31 dengan ukuran partikel rata-rata  $84,270 \pm 18,105 \mu\text{m}$  dan derajat kristalinitas mencapai 68,087%.

#### 5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Gunawan selaku laboran Laboratorium Riset Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Sintha Soraya Santi selaku koordinator Program Studi Teknik Kimia Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur dan penguji atas saran dan masukan serta dukungan fasilitas selama penelitian berlangsung.

## 6. Referensi

- [1] S. Dwiputranto dan L. Jacobus, *Potensi Eceng Gondok Sebagai Bahan Organik Biogasa*. Matara: PT. Rajawali Media Utama, 2023.
- [2] S. R. Kalekar dan D. D. J. Pandya, "Eicchornia crassipes: Not As Bad As It Seems.," *Int. J. Pharm. Res. Appl.*, vol. 9, no. 3, 2024, doi: 10.35629/4494-09033556.
- [3] M. K. Rosyidy dan Q. P. Ashilah, "Pemanfaatan Citra Sentinel-2 Untuk Monitoring Sebaran dan Luasan Eceng Gondok Secara Spasio-Temporal Sebagai Upaya Menjaga Kondisi Air dan Sanitasi di Inlet Waduk Saguling, Jawa Barat," *LAPAN Sinas Inderaja*, 2019.
- [4] A. Arivendan, W. J. J. Thangiah, S. Irulappasamy, dan B. N. Chrish, "Study on characterization of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) novel natural fiber as reinforcement with epoxy polymer matrix material for lightweight applications," *J. Ind. Text.*, vol. 51, no. 5, hlm. 8157–8174, Jun 2022, doi: 10.1177/15280837211067281.
- [5] W. Fatiasari, N. Masruchin, dan E. Hermiati, *Selulosa Karakteristik dan Pemanfaatannya*. Jakarta: Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), 2019.
- [6] H. Suryadi, S. Sutriyo S, M. Angeline, dan M. W. Murti, "Characterization of Microcrystalline Cellulose Obtained from Enzymatic Hydrolysis of Alpha-Cellulose and its Application," *J. Young Pharm.*, vol. 10, no. 2, hlm. 87–92, Jul 2018, doi: 10.5530/jyp.2018.2s.17.
- [7] R. C. Rowe, P. J. Sheskey, dan S. C. Owen, *Handbook of Pharmaceutical Excipients*, Fifth. London, Chicago: Pharmaceutical Press and American Pharmacists Association, 2006.
- [8] M. N. Islam *dkk.*, "Microcrystalline Cellulose from Jute Fiber: A Bright Prospect for Pharmaceutical Industry," *Sch. Int. J. Chem. Mater. Sci.*, vol. 5, no. 6, hlm. 100–104, Agu 2022, doi: 10.36348/sijcms.2022.v05i06.003.
- [9] S. Nagarajan, N. C. Skillen, J. T. S. Irvine, L. A. Lawton, dan P. K. J. Robertson, "Cellulose II as bioethanol feedstock and its advantages over native cellulose," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, hlm. 182–192, Sep 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.118.
- [10] C. Krueger, M. Thommes, dan P. Kleinebudde, "'MCC SANAQ®burst' A New Type of Cellulose and its Suitability to Prepare Fast Disintegrating Pellets," *J. Pharm. Innov.*, vol. 5, no. 1–2, hlm. 45–57, Jul 2010, doi: 10.1007/s12247-010-9080-4.
- [11] M. Maturi, C. Spanu, A. Baschieri, M. Comes Franchini, E. Locatelli, dan L. Sambri, "Iridium-Functionalized Cellulose Microcrystals as a Novel Luminescent Biomaterial for Biocomposites," *Biomolecules*, vol. 12, no. 9, hlm. 1165, Agu 2022, doi: 10.3390/biom12091165.
- [12] I. M. J. Astika, *Selulosa Alfa Kapuk Randu Sebagai Bahan Baku Propellant Amunisi*. Surabaya: Brilian Internasional, 2020.
- [13] R. Raudhatussyarifah, W. B. Sediawan, M. M. Azis, dan I. Hartati, "Microcrystalline cellulose production by acid hydrolysis of hydrotropic rice straw pulp," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 963, no. 1, hlm. 012055, Jan 2022, doi: 10.1088/1755-1315/963/1/012055.
- [14] S. Wu, S. Shi, R. Liu, C. Wang, J. Li, dan L. Han, "The transformations of cellulose after concentrated sulfuric acid treatment and its impact on the enzymatic saccharification," *Biotechnol. Biofuels Bioprod.*, vol. 16, no. 36, hlm. 1–10, Mar 2023, doi: 10.1186/s13068-023-02293-4.
- [15] T. Komatsu dan T. Yokoyama, "Revisiting the condensation reaction of lignin in alkaline pulping with quantitativity part III: predominant formation of  $\alpha$ - $\beta$ -type over  $\alpha$ -5-type condensation product in soda cooking treatments of apocynol and creosol," *J. Wood Sci.*, vol. 68, no. 1, hlm. 1–11, Des 2022, doi: 10.1186/s10086-022-02069-8.
- [16] L. Lismeri, Y. Darni, M. D. Sanjaya, dan M. I. Immadudin, "Pengaruh Suhu Dan Waktu Pretreatment Alkali Pada Isolasi Selulosa Limbah Batang Pisang," *J. Chem. Process Eng.*, vol. 4, no. 1, hlm. 18–22, 2019.
- [17] S. D. Shinde, X. Meng, R. Kumar, dan A. J. Ragauskas, "Recent advances in understanding the pseudo-lignin formation in lignocellulosic 2 biorefinery," *Green Chem.*, hlm. 1–34, 2018.
- [18] Jayanudin, "Pemutihan Daun Nanas Menggunakan Hidrogen Peroksida," *J. Rekayasa Proses*, vol. 3, no. 1, hlm. 10–14, 2009.
- [19] E. D. Wahyuni, N. E. Putri, dan M. P. Satio, "Analisis Waktu Hidrolisis Terhadap Kadar Glukosa Dalam Proses Pembuatan Bioetanol Dari Limbah Pisang," *J. Inov.*, vol. 8, no. 2, hlm. 64–69, 2025.
- [20] Valchev, Ivo, Nikolay Yavorov, and Desislava Todorova. "Producing bleached microcrystalline cellulose by two-stage dilute acid hydrolysis." *Cellul. Chem. Technol* 54 (2020): 259-264.
- [21] H. Sun *dkk.*, "Effect of delignification treatment on the cell wall and hygroscopicity of Chinese fir," *Ind. Crops Prod.*, vol. 235, hlm. 1–13, Nov 2025, doi: 10.1016/j.indcrop.2025.121700.

- [22] R. C. R. Nunes, “Rubber nanocomposites with nanocellulose,” *Elsevier*, hlm. 463–494, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100409-8.00013-9>.
- [23] D. Sawada *dkk.*, “Untangling the threads of cellulose mercerization,” *Nat. Commun.*, vol. 13, no. 6189, hlm. 1–6, Okt 2022, doi: 10.1038/s41467-022-33812-w.
- [24] S. Susi, M. Ainuri, W. Wagiman, dan M. A. F. Falah, “Characterization and Selection of Microcrystalline Cellulose from Oil Palm Empty Fruit Bunches for Strengthening Hydrogel Films,” *J. Renew. Mater.*, vol. 12, no. 3, hlm. 513–537, 2024, doi: 10.32604/jrm.2024.045586.
- [25] M. Krstic, Z. Maksimovic, S. Ibric, T. Bakic, dan S. Razic, “Lignocellulosic Biomass As A Source Of Microcrystalline Cellulose – Chemical And Technological Characterization And Future Perspectives,” *Cellul. Chem. Technol.*, vol. 52, no. 7–8, 2018.
- [26] F. Fitriani, S. Aprilia, N. Arahman, dan M. R. Bilad, “Effect of Acid Concentration on the Properties of Microcrystalline Cellulose from Pineapple Crown Leaf,” *J. Rekayasa Kim. Lingkungan.*, vol. 17, no. 1, hlm. 1–7, Mei 2022, doi: 10.23955/rkl.v17i1.21010.