Quimica: Jurnal Kimia Sains dan Terapan **ISSN 2716-0963**
Volume 8, Nomor 1, April 2026 **e-ISSN 2716-1218**

Nanokristal Selulosa dari Limbah Pertanian: Pengaruh Parameter Proses Terhadap Struktur dan Sifat Material (Tinjauan Literatur)

Rahayu[1]*, Rizki Damayanti[1], Sari Rizky[1], Rauzah Munauwarah[1], Yulida Amri[1], Lidya Novita[2]

[1]*Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Samudra, Langsa 24416, Indonesia*
[2]*Jurusan Gizi, Poltekkes Kemenkes Riau, Pekanbaru, Riau, 28122, Indonesia*

* Corresponding author: rahayu@unsam.ac.id

ABSTRAK

Biomassa lignoselulosa dari limbah pertanian memiliki potensi besar sebagai bahan baku dalam produksi nanokristal selulosa (*cellulose nanocrystals*, CNC) yang bersifat ramah lingkungan dan berkelanjutan. Artikel ini merupakan tinjauan literatur yang bertujuan untuk mengkaji pengaruh parameter proses sintesis terhadap struktur dan sifat material CNC yang dihasilkan dari berbagai limbah pertanian. Penyusunan artikel dilakukan melalui studi literatur terhadap lebih dari 25 artikel ilmiah nasional dan internasional yang dipublikasikan pada rentang tahun 2014–2025 dan diperoleh dari basis data seperti *ScienceDirect, Springer, MDPI*, dan *Google Scholar*. Artikel dipilih berdasarkan relevansi terhadap sintesis CNC dari limbah pertanian, metode hidrolisis, serta pembahasan parameter proses dan karakteristik material CNC. Dalam kajian literatur ini, parameter sintesis seperti waktu dan suhu sintesis, konsentrasi asam pada proses hidrolisis, serta sumber biomassa menjadi perhatian utama yang dibahas. Lebih lanjut, studi ini menekankan korelasi antara parameter ini dan karakteristik material, khususnya sifat struktural, ukuran partikel, dan morfologi CNC. Dengan pengembangan metode sintesis yang lebih efisien dan berkelanjutan, CNC yang diperoleh dari limbah pertanian memiliki prospek besar sebagai material ramah lingkungan untuk berbagai aplikasi di masa mendatang.

Kata Kunci: Kristalinitas, Limbah Pertanian, Nanokristal Selulosa

PENDAHULUAN

Biomassa lignoselulosa merupakan salah satu sumber bahan baku terbarukan yang paling melimpah di alam. Limbah pertanian seperti sekam padi, jerami gandum, ampas tebu, tongkol jagung, dan serat pisang mengandung komponen utama berupa selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Kandungan selulosa yang cukup tinggi pada limbah tersebut menjadikannya berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam pengembangan material berbasis biomassa [1], [2]. Pemanfaatan limbah pertanian tidak hanya dapat meningkatkan nilai tambah dari limbah yang dihasilkan, tetapi juga berkontribusi dalam mendukung konsep pemanfaatan sumber daya yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Dalam beberapa tahun terakhir, perhatian terhadap material berbasis selulosa skala nano semakin meningkat, terutama pada CNC. CNC merupakan material nano yang dihasilkan melalui proses hidrolisis selulosa. Proses ini menghilangkan bagian amorf dan menyisakan struktur kristalin dengan ukuran nanometer. CNC memiliki berbagai keunggulan, seperti luas permukaan yang besar, kekuatan mekanik yang baik, biodegradabilitas, serta stabilitas termal yang relatif tinggi [3]. CNC banyak dikembangkan untuk berbagai aplikasi, seperti bahan penguat pada biokomposit, kemasan ramah lingkungan, material biomedis, serta sensor.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mensintesis CNC dari biomassa lignoselulosa. Metode yang paling umum digunakan adalah hidrolisis asam, yang mampu menghasilkan CNC dengan tingkat kristalinitas yang tinggi. Selain itu, beberapa metode lain seperti hidrolisis enzimatik, oksidasi TEMPO (2,2,6,6-Tetramethylpiperidin-1-yl)oxyl), serta perlakuan mekanik juga telah dikembangkan untuk menghasilkan nanokristal selulosa dengan karakteristik yang berbeda [4]. Dalam proses sintesis tersebut, terdapat beberapa parameter proses yang sangat berpengaruh terhadap karakteristik CNC yang

dihasilkan. Parameter seperti konsentrasi asam, suhu reaksi, waktu hidrolisis, serta rasio bahan terhadap pelarut dapat mempengaruhi ukuran partikel, morfologi, indeks kristalinitas, serta stabilitas termal dari CNC [5].

Meskipun berbagai penelitian mengenai sintesis CNC dari limbah pertanian telah banyak dilaporkan, sebagian besar penelitian masih berfokus pada metode ekstraksi atau pengembangan aplikasinya [6]. Kajian yang secara khusus membahas hubungan antara parameter proses sintesis dengan karakteristik struktur serta sifat CNC yang dihasilkan dari berbagai sumber limbah pertanian masih relatif terbatas. Padahal, pemahaman mengenai hubungan antara parameter proses dengan struktur dan sifat material sangat penting untuk mengoptimalkan produksi CNC dengan karakteristik yang diinginkan.

Oleh karena itu, tinjauan literatur ini bertujuan untuk mengkaji potensi limbah pertanian sebagai sumber selulosa dalam produksi nanokristal selulosa, membahas berbagai metode sintesis CNC, serta menganalisis pengaruh parameter proses terhadap struktur, termasuk ukuran partikel, dan sifat material yang dihasilkan. Diharapkan kajian ini dapat memberikan gambaran yang lebih sistematis mengenai hubungan antara proses sintesis dengan karakteristik CNC, serta menjadi referensi bagi pengembangan penelitian selanjutnya dalam bidang material berbasis biomassa.

LIMBAH PERTANIAN SEBAGAI SUMBER SELULOSA

Limbah pertanian merupakan salah satu sumber biomassa lignoselulosa yang melimpah dan berpotensi besar untuk dimanfaatkan dalam produksi material berbasis selulosa. Biomassa lignoselulosa umumnya tersusun atas tiga komponen utama, yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Kandungan selulosa pada berbagai limbah pertanian cukup tinggi sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam sintesis CNC [1].

Setiap jenis limbah pertanian memiliki komposisi lignoselulosa yang berbeda, sehingga dapat mempengaruhi karakteristik CNC yang dihasilkan [6]. Perbedaan komposisi tersebut dapat mempengaruhi proses ekstraksi selulosa serta karakteristik nanokristal yang dihasilkan. Dengan ketersediaan limbah pertanian yang melimpah serta kandungan selulosa yang cukup tinggi, biomassa ini memiliki potensi besar sebagai bahan baku dalam produksi CNC. Pemanfaatan limbah pertanian dalam pengembangan material berbasis selulosa juga sejalan dengan konsep *sustainable materials* dan ekonomi sirkular, yang menekankan pemanfaatan kembali sumber daya secara efisien dan ramah lingkungan. Beberapa penelitian terdahulu terkait sintesis CNC dari limbah pertanian dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel. 1 Beberapa penelitian yang relevan terkait sintesis CNC dari limbah pertanian

Sumber biomassa	Metode sintesis	Parameter penting	Hasil utama	Ref
Tongkol jagung Afrika Selatan	Hidrolisis asam	suhu 30,18 °C, waktu reaksi 30,13 menit, dan konsentrasi asam sulfat 46 wt%.	kristalinitas (79,11%), hasil optimum sebesar 80,53%	[7]
Ampas tebu	Hidrolisis asam	Asam sulfat 64% (b/v), suhu 50 °C selama 45 menit	Morfologi berbentuk batang, derajat polimerisasi 108,2 dan Indeks Kristalinitas (C·I.) sebesar 55,1%,	[3]
Jerami padi	Hidrolisis dan ultrasonikasi	Asam sulfat 51,62%, waktu ultrasonik 48,55 menit, dan daya ultrasonik 238,80 W.	Yield 52,2%, ukuran partikel rata-rata 65,87 nm dan indeks kristalinitas 90,01%	[8]
Ampas apel	Hidrolisis dan ultrasonikasi	Asam sulfat 45% pada suhu 50°C selama 45 menit, disonikasi dengan probe 3 mm dan daya 70 W selama 10 menit.	Indeks kristalinitas 78%, struktur seperti jarum dengan diameter 7,9±1,25 nm dan panjang 28 ± 2,03 nm.	[9]
Serat limbah daun teh	Hidrolisis asam	Asam sulfat 65%, pada suhu 45 °C selama 45 menit.	Indeks kristalinitas 83,1%, berbentuk jarum dengan	[10]

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

Sumber biomassa	Metode sintesis	Parameter penting	Hasil utama	Ref
			diameter rata-rata 7,97 nm.	
Kulit buah kakao	Hidrolisis asam	Asam sulfat 64% pada suhu 45°C selama 60 menit	Diameter, panjang, dan indeks kristalinitas masing-masing adalah 10–60 nm, 41–155 nm, dan 67,60%.	[11]
Jerami bawang putih	Hidrolisis asam	Asam sulfat 65%, pada suhu 45 °C selama 40 menit	Indeks kristalinitas 68%, berbentuk jarum, dengan diameter dan panjang rata-rata 6 nm dan 480 nm.	[12]
Kulit kenari	Hidrolisis dan ultrasonikasi	Asam sulfat 64%, ultrasonikasi dengan daya 350 W selama 3 menit.	Indeks kristalinitas 60%, diameter bola ekuivalen rata-rata 130 ± 16 nm.	[13]

METODE SINTESIS SELULOSA NANOKRISTAL

Hidrolisis Asam

Hidrolisis asam merupakan metode yang paling banyak digunakan dalam produksi CNC. Teknik ini menggunakan asam kuat, termasuk asam sulfat (H_2SO_4), asam fosfat (H_3PO_4), dan asam klorida (HCl), untuk memfasilitasi hidrolisis daerah amorf selulosa [14]. Proses ini menghasilkan nanokristal selulosa dengan ukuran partikel yang kecil dan tingkat kristalinitas yang tinggi. Namun, dengan peningkatan konsentrasi asam >60%, daerah kristal juga akan diserang mengakibatkan kerusakan domain kristal, sehingga menghasilkan *yield* CNC yang rendah [15]. Selain itu, konsentrasi asam yang tinggi rentan terhadap korosi peralatan sehingga perlunya metodologi pemurnian yang lebih rumit, dan potensi konsekuensi lingkungan yang merugikan terkait dengan limbah asam. Untuk mengatasi kekurangan ini, para peneliti kini berfokus pada hidrolisis asam organik dan hidrolisis asam campuran bersama dengan sebagian asam mineral. Di antara semua hidrolisis asam, CNC yang dihidrolisis asam organik memberikan stabilitas termal yang tinggi, stabilitas koloid yang lebih baik, penggunaan kembali asam, dan korosi peralatan yang lebih sedikit [16].

Hidrolisis Enzimatik

Hidrolisis enzimatik menggunakan enzim selulase untuk menguraikan bagian amorf dari selulosa. Teknik ini dianggap lebih ramah lingkungan karena menghindari bahan kimia korosif. Selanjutnya, proses ini biasanya terjadi di bawah suhu dan kondisi pH yang lebih ringan. Namun demikian, proses hidrolisis enzimatik umumnya dicirikan oleh durasi yang lebih lama (24-120 jam) dan biaya enzim yang relatif tinggi dibandingkan dengan metode hidrolisis asam [17].

Metode Oksidasi

Metode oksidasi dapat dirincikan menjadi dua tahapan, yaitu oksidasi gugus hidroksil permukaan (-OH) dan penghilangan daerah amorf. Hal ini menghasilkan struktur dengan gugus karboksil bermuatan negatif (-COOH), yang dapat memfasilitasi dispersi CNC dalam larutan berair dan memungkinkan modifikasi lebih lanjut pada permukaan CNC [18]. Metode yang paling umum adalah oksidasi TEMPO (2,2,6,6-tetramethylpiperidine-1-oxyl), yang melibatkan reaksi oksidasi selektif pada gugus hidroksil selulosa sehingga menghasilkan nanokristal dengan gugus fungsional pada permukaannya. Keunggulan metode ini adalah kemampuan menghasilkan CNC dengan stabilitas dispersi yang baik dalam media air. Hal ini membuat CNC hasil oksidasi TEMPO banyak digunakan dalam aplikasi material komposit dan biomedis.

Perlakuan Mekanik

Selain metode kimia, proses mekanik juga dapat digunakan untuk menghasilkan nanomaterial berbasis selulosa. Beberapa teknik mekanik yang sering digunakan antara lain ultrasonikasi, homogenisasi tekanan tinggi, fluidisasi mikro, *cyocrushing, grinding,* dan *ball milling* [16]. Metode ini memanfaatkan energi mekanik untuk memecah struktur serat selulosa menjadi skala nano. Namun demikian, metode mekanik biasanya membutuhkan energi yang cukup tinggi

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

dan sering digunakan sebagai proses tambahan setelah perlakuan kimia atau pretreatment.

PARAMETER SINTESIS CNC

Konsentrasi Asam

Konsentrasi asam merupakan salah satu parameter paling penting dalam proses hidrolisis asam. Konsentrasi asam yang lebih tinggi umumnya mampu mempercepat proses hidrolisis daerah amorf selulosa [19]. Namun, konsentrasi asam yang terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi struktur selulosa sehingga menurunkan rendemen CNC yang dihasilkan.

Suhu Hidrolisis

Suhu reaksi mempengaruhi kinetika reaksi hidrolisis. Peningkatan suhu reaksi dapat mempercepat proses pemecahan struktur amorf selulosa. Akan tetapi, suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi selulosa serta mempengaruhi stabilitas struktur nanokristal yang dihasilkan [8].

Waktu Reaksi

Waktu hidrolisis menentukan sejauh mana bagian amorf selulosa dapat dihilangkan selama proses sintesis. Waktu reaksi yang terlalu singkat dapat menghasilkan CNC dengan kristalinitas yang rendah, sedangkan waktu yang terlalu lama dapat menyebabkan kerusakan struktur kristalin selulosa [7].

STRUKTUR DAN SIFAT CNC

Morfologi dan Ukuran Partikel

Ukuran partikel dan morfologi merupakan salah satu karakteristik utama dari CNC. Umumnya, CNC memiliki bentuk *rod-like* atau *needle-like* dengan diameter berkisar antara beberapa nanometer hingga puluhan nanometer dan panjang sekitar 100–500 nm. Dimensi dan bentuk CNC dapat dipengaruhi oleh sumber biomassa serta kondisi spesifik yang digunakan selama proses sintesis [20]. Teknik karakterisasi seperti *scanning electron microscopy* (SEM) sering digunakan untuk mengamati morfologi CNC, serta *transmission electron microscopy* (TEM), hingga *high resolution-transmission electron microscopy* (HR-TEM) digunakan untuk mengamati ukuran partikel CNC. Tergantung pada morfologinya, CNC yang berbeda cocok untuk berbagai aplikasi. CNC dengan rasio aspek tinggi dan kristalinitas tinggi menarik untuk penguatan polimer. Di sisi lain, CNC dengan rasio aspek rendah lebih cocok sebagai kristal cair dalam jendela pintar dan tampilan dioda pemancar cahaya (LED) [17].

Kristalinitas

Indeks kristalinitas merupakan parameter penting yang menunjukkan proporsi bagian kristalin dalam struktur selulosa. Proses hidrolisis pada sintesis CNC umumnya bertujuan untuk menghilangkan bagian amorf dari selulosa sehingga meningkatkan kristalinitas material. Selama perlakuan mekanis dan kimia, gugus hidroksil di daerah amorf dimodifikasi, sehingga mengakibatkan perubahan pembengkakan dan kristalinitas relatif [5]. Kristalinitas CNC umumnya relatif tinggi dalam kisaran 70-90% [21]. Nilai kristalinitas CNC biasanya dianalisis menggunakan teknik *X-ray diffraction* (XRD). CNC dengan tingkat kristalinitas yang tinggi umumnya memiliki kekuatan mekanik yang lebih baik.

Stabilitas Termal

Stabilitas termal merupakan sifat penting yang menentukan ketahanan CNC terhadap suhu tinggi. Stabilitas termal sangat bergantung pada kimia permukaan CNC dan umumnya dinilai menggunakan *thermogravimetric analysis* (TGA), *derivative thermogravimetric analysis* (DTG), dan *differential scanning calorimetry* (DSC) [16]. Stabilitas termal CNC dapat dipengaruhi oleh metode sintesis serta jenis bahan baku yang digunakan. Misalnya, CNC yang dihasilkan melalui hidrolisis asam sulfat sering menunjukkan stabilitas termal yang sedikit lebih rendah karena adanya gugus sulfat pada permukaannya.

Sifat Permukaan

Permukaan CNC mengandung gugus hidroksil yang memungkinkan terjadinya berbagai interaksi kimia dengan material lain. Permukaan ini mampu menyerap air dalam jumlah signifikan, di mana molekul air cenderung terakumulasi di sekitar kation (seperti Na^+) dan menunjukkan

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

orientasi teratur dengan atom oksigen mengarah ke kation tersebut [22]. Sifat ini membuat CNC mudah dimodifikasi secara kimia untuk meningkatkan kompatibilitasnya dengan berbagai matriks polimer. Modifikasi permukaan CNC dapat meningkatkan stabilitas dispersi serta memperluas aplikasinya dalam berbagai bidang material.

Sifat Mekanik

Salah satu ciri penting dari nanokristal selulosa adalah kekakuannya yang tinggi dan morfologinya yang memanjang. Sifat-sifat tersebut berasal dari kekakuan tinggi selulosa kristalin yang memberikan kekuatan pada tumbuhan tingkat tinggi, dimensi skala nano, dan rasio aspek tinggi dari nanopartikel, serta reaktivitas selulosa yang tinggi. Namun, untuk meningkatkan sifat mekanik material induk dan memanfaatkan sifat ini, perlu diberikan perhatian khusus pada pemrosesan nanokomposit [20].

HUBUNGAN ANTARA PARAMETER PROSES DAN SIFAT CNC

Pengaruh Konsentrasi Asam

Konsentrasi asam dalam proses hidrolisis berpengaruh langsung terhadap tingkat pemecahan struktur amorf selulosa. Konsentrasi asam yang tinggi umumnya meningkatkan efisiensi hidrolisis sehingga menghasilkan CNC dengan kristalinitas yang tinggi. Namun, konsentrasi yang terlalu tinggi ($>60\%$) dapat menyebabkan degradasi selulosa dan menurunkan yield produk. Alasan peningkatan kristalinitas disebabkan oleh pemecahan ikatan glikosidik di daerah amorf rantai selulosa dan pelarutan asam selanjutnya. Penurunan kristalinitas pada peningkatan konsentrasi asam lebih lanjut disebabkan oleh hidrolisis daerah kristal teratur bersama dengan daerah amorf menjadi gula, sehingga mengurangi indeks kristalinitas [8]. Berdasarkan kajian dari beberapa literatur tersebut, menunjukkan hasil optimum diperoleh pada konsentrasi asam 58-60% yang menghasilkan krsitalinitas tertinggi tanpa merusak domain kristal lebih lanjut.

Penelitian sebelumnya [8] dilaporkan bahwa ukuran partikel rata-rata berkurang dari 126,41 menjadi 29,47 nm pada peningkatan konsentrasi asam sulfat dari 40% menjadi 70%. Pengurangan ukuran partikel ini terutama merupakan hasil interaksi ion hidronium dengan ikatan glikosidik dalam rantai selulosa, yang mengarah pada pembebasan unit kristal individu. Selanjutnya, ketika konsentrasi asam sulfat meningkat, sejumlah besar ion hidronium mendorong pembubaran daerah amorf, yang berkontribusi pada pengurangan ukuran partikel. Namun, peningkatan konsentrasi asam setelah 60% menghasilkan pengurangan ukuran partikel yang lebih kecil. Fenomena ini dapat dikaitkan dengan penghapusan bersamaan dari daerah kristal biasa dan area amorf pada konsentrasi tinggi, sebagaimana dikuatkan oleh temuan yang terkait dengan indeks kristalinitas, yang menunjukkan penurunan pada konsentrasi asam yang lebih tinggi.

Pengaruh Suhu Hidrolisis

Suhu reaksi mempengaruhi kecepatan reaksi hidrolisis. Peningkatan suhu dapat mempercepat proses pemecahan bagian amorf selulosa. Akan tetapi, suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kerusakan struktur kristalin selulosa sehingga mempengaruhi kualitas CNC yang dihasilkan. Berdasarkan penelitian terdahulu [23], variasi suhu reaksi pada rentang 30–50 °C selama hidrolisis asam sulfat terhadap α-selulosa dari jerami padi berpengaruh signifikan terhadap hasil CNC. Kondisi optimum diperoleh pada suhu 30 °C, yang menghasilkan rendemen CNC tinggi, yaitu sekitar 90,28%. Pada kondisi ini, CNC yang terbentuk menunjukkan morfologi berbentuk batang (*rod-like*) dengan diameter sekitar 5–15 nm, serta memiliki indeks kristalinitas sebesar 76%, lebih tinggi dibandingkan α-selulosa awal yang hanya 62,4%. Hal ini menunjukkan bahwa suhu reaksi yang tepat dapat mendukung pembentukan struktur kristalin yang lebih baik sekaligus mempertahankan morfologi nano dari CNC yang dihasilkan [23].

Pengaruh Waktu Reaksi

Waktu hidrolisis juga merupakan parameter penting dalam proses sintesis CNC. Waktu reaksi yang terlalu singkat dapat menyebabkan hidrolisis tidak berlangsung secara optimal sehingga bagian amorf selulosa masih tersisa.

Sebaliknya, waktu hidrolisis yang terlalu lama dapat menyebabkan degradasi struktur kristalin selulosa. Berdasarkan studi sebelumnya [24], variasi waktu hidrolisis pada rentang 45–75 menit selama hidrolisis asam sulfat terhadap selulosa termurnikan dari tempurung kelapa menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap hasil CNC. Waktu hidrolisis termasuk faktor yang berpengaruh nyata terhadap rendemen CNC, dengan nilai signifikansi p = 0,0106. Hasil optimasi menunjukkan bahwa kondisi terbaik diperoleh pada waktu hidrolisis 45 menit, bersama konsentrasi asam sulfat 55% dan suhu 45 °C, yang menghasilkan rendemen CNC sebesar 82,47%. Selain itu, peningkatan waktu hidrolisis mula-mula dapat meningkatkan rendemen, tetapi setelah melewati kondisi optimum justru menurunkannya akibat degradasi berlebih pada komponen selulosa menjadi produk yang tidak diinginkan [24].

Pengaruh Sumber Biomassa

Jenis biomassa sebagai bahan baku memiliki pengaruh penting terhadap karakteristik CNC yang dihasilkan, karena setiap biomassa memiliki komposisi lignoselulosa dan struktur serat yang berbeda. Hal ini ditunjukkan dalam penelitian sebelumnya [1] yang membandingkan CNC dari sekam gandum, jerami gandum, dan jerami rami menggunakan metode isolasi yang sama. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jerami rami menghasilkan CNC dengan dimensi lebih besar, jerami gandum memiliki kristalinitas tertinggi, sedangkan sekam gandum menghasilkan CNC berukuran lebih kecil dan relatif lebih seragam. Perbedaan tersebut berkaitan dengan sifat awal biomassa, di mana sekam gandum dan jerami gandum memiliki struktur lebih kaku akibat kandungan lignin yang lebih tinggi, sementara jerami rami memiliki serat yang lebih halus, lebih panjang, dan kandungan selulosa yang lebih tinggi.

Tabel. 2 Pengaruh parameter proses terhadap struktur dan morfolofi CNC

Parameter Proses	Kondisi Proses	Dampak pada struktur CNC	Dampak pada morfologi CNC	Ref
Konsentrasi asam	40-70%	Konsentrasi asam sulfat memiliki efek positif dalam meningkatkan kristalinitas hingga batas tertentu, setelah itu kristalinitas menurun.	Ukuran partikel ~ 65 nm. Dengan peningkatan konsentrasi asam , lebih banyak ion hidronium memfasilitasi pelarutan daerah amorf, sehingga mengurangi ukuran partikel—namun, peningkatan konsentrasi asam setelah 60% menghasilkan pengurangan ukuran partikel yang lebih kecil.	[8]
Suhu hidrolisis	Suhu hidrolisis divariasikan pada 30–50 °C	Suhu memengaruhi yield dan kristalinitas CNC. Pada kondisi optimum, CNC yang dihasilkan memiliki indeks kristalinitas 76%, lebih tinggi daripada α-selulosa (62,4%).	Pada kondisi optimum terbentuk CNC berbentuk batang (*rod-like*) dengan diameter sekitar 5–15 nm; suhu berpengaruh terhadap pembentukan dan pemisahan kristal selama hidrolisis.	[23]
Waktu reaksi	45-75 menit	Mempengaruhi rendemen CNC; waktu terlalu lama dapat menyebabkan degradasi selulosa.	Ukuran partikel ~55 nm. Mempengaruhi pembentukan partikel nano; waktu optimum membantu mempertahankan struktur CNC.	[24]
Sumber biomassa	Sekam gandum, jerami gandum, dan jerami rami.	Mempengaruhi ukuran dan kristalinitas CNC; jerami rami menghasilkan CNC lebih besar, jerami gandum kristalinitas tertinggi, sekam gandum lebih kecil dan seragam.	Mempengaruhi bentuk dan dispersi serat; sekam gandum lebih kaku dan menggumpal, jerami gandum lebih terbuka, jerami rami paling halus dan terdispersi baik.	[1]

APLIKASI CNC

Nanokristal selulosa (CNC) memiliki berbagai sifat unggul seperti kekuatan mekanik yang tinggi, luas permukaan yang besar, biodegradabilitas,

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

serta stabilitas kimia yang baik. Karakteristik tersebut membuat CNC berpotensi digunakan dalam berbagai bidang aplikasi. Salah satu aplikasi utama CNC adalah sebagai bahan penguat dalam material komposit [25]. Penambahan CNC pada matriks polimer dapat meningkatkan kekuatan mekanik, kekakuan, serta stabilitas termal material komposit. Oleh karena itu, CNC banyak digunakan dalam pengembangan biokomposit berbasis polimer ramah lingkungan.

Selain itu, CNC juga memiliki potensi besar dalam bidang kemasan makanan (*food packaging*) [26]. Sifat biodegradabel dan kemampuan membentuk film yang baik menjadikan CNC sebagai alternatif material kemasan yang lebih ramah lingkungan dibandingkan plastik konvensional. Dalam bidang biomedis, CNC dapat digunakan sebagai bahan dalam sistem penghantaran obat (*drug delivery system*) [27], *scaffold* jaringan [28], serta material biomaterial lainnya. CNC dengan hidrofilisitas tinggi dianggap sebagai komponen hidrogel yang menjanjikan karena sifat intrinsiknya yang menarik seperti sifat biokompatibel, sifat mekanik yang menjanjikan (kekuatan lebih dari 10 GPa, modulus elastisitas 150 GPa), dan densitas rendah [29].

TANTANGAN DAN PERSPEKTIF MASA DEPAN

Meskipun nanokristal selulosa memiliki potensi yang besar dalam berbagai aplikasi, masih terdapat beberapa tantangan yang perlu diatasi dalam pengembangannya. Kendala utama berkaitan dengan proses produksi skala industri CNC. Secara dominan, metodologi sintesis yang saat ini digunakan terbatas pada pengaturan laboratorium dan memerlukan penyempurnaan lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi produksi sekaligus mengurangi biaya terkait. Selanjutnya, penggunaan bahan kimia kuat dalam teknik hidrolisis asam menimbulkan kekhawatiran mengenai konsekuensi ekologisnya. Oleh karena itu, pengembangan metode sintesis yang lebih ramah lingkungan (*green synthesis*) menjadi salah satu arah penelitian yang penting di masa depan. Tantangan lainnya adalah standardisasi parameter proses sintesis CNC. Perbedaan variabel seperti konsentrasi asam, suhu reaksi, dan durasi hidrolisis di berbagai penyelidikan menghasilkan variabilitas dalam sifat-sifat CNC yang dihasilkan. Dengan demikian, penyelidikan yang lebih sistematis sangat penting untuk memastikan kondisi pemrosesan optimal untuk produksi CNC yang berasal dari beragam sumber biomassa. Dalam upaya penelitian selanjutnya, diantisipasi bahwa penyelidikan ke dalam nanokristal selulosa akan semakin menekankan kemajuan metodologi sintesis berkelanjutan, peningkatan efisiensi produksi, dan eksplorasi aplikasi baru dalam domain bahan canggih dan teknologi ramah lingkungan.

KESIMPULAN

Kajian literatur ini menunjukkan bahwa limbah pertanian memiliki potensi besar sebagai sumber selulosa untuk produksi nanokristal selulosa (CNC) melalui berbagai metode sintesis, khususnya hidrolisis asam. Berdasarkan berbagai penelitian yang dikaji, karakteristik CNC sangat dipengaruhi oleh parameter proses sintesis, terutama konsentrasi asam, suhu, waktu hidrolisis, dan jenis biomassa yang digunakan. Di antara parameter tersebut, konsentrasi asam merupakan faktor yang paling dominan karena secara langsung menentukan tingkat penghilangan daerah amorf, ukuran partikel, kristalinitas, serta stabilitas struktur CNC. Konsentrasi asam sulfat pada rentang 58–60% umumnya menghasilkan CNC dengan kristalinitas tinggi dan morfologi yang optimal tanpa menyebabkan kerusakan domain kristal secara signifikan. Selain itu, suhu dan waktu hidrolisis yang terlalu tinggi juga dapat memicu degradasi struktur kristalin sehingga menurunkan kualitas CNC. Secara keseluruhan, review ini menegaskan bahwa optimasi parameter proses menjadi kunci utama dalam menghasilkan CNC dengan sifat struktural dan morfologi yang sesuai untuk pengembangan material berkelanjutan berbasis biomassa.

REFERENSI

[1] Babaei-ghazvini, R. Patel, B. Vafakish, S. Mcalpine, and B. Acharya, “Bioresource Technology One-pot catalytic isolation of cellulose nanocrystals from agricultural biomass – Oat hull , wheat straw , and flax straw : Physicochemical characterization,” *Bioresour. Technol.*, vol. 424, no. February, p. 132271, 2025, doi: 10.1016/j.biortech.2025.132271.

[2] M. Smyth, A. García, C. Rader, E. J. Foster, and J. Bras, "Industrial Crops & Products Extraction and process analysis of high aspect ratio cellulose nanocrystals from corn (Zea mays) agricultural residue," *Ind. Crop. Prod.*, vol. 108, no. May, pp. 257–266, 2017, doi: 10.1016/j.indcrop.2017.06.006.

[3] C. Verma, M. Chhajed, P. Gupta, S. Roy, and P. K. Maji, "International Journal of Biological Macromolecules Isolation of cellulose nanocrystals from different waste bio-mass collating their liquid crystal ordering with morphological exploration," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 175, pp. 242–253, 2021, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.02.038.

[4] S. Mishra, P. S. Kharkar, and A. M. Pethe, "Biomass and waste materials as potential sources of nanocrystalline cellulose: Comparative review of preparation methods (2016–Till date)," *Carbohydr. Polym.*, vol. 207, pp. 418–427, 2019.

[5] M. Jonoobi, R. Oladi, and Y. Davoudpour, "Different preparation methods and properties of nanostructured cellulose from various natural resources and residues : a review," pp. 935–969, 2015, doi: 10.1007/s10570-015-0551-0.

[6] K. T. Chaka, "Green Chemistry Letters and Reviews Extraction of cellulose nanocrystals from agricultural by-products : a review," vol. 8253, 2022, doi: 10.1080/17518253.2022.2121183.

[7] O. O. Sadare, N. Mabunda, and U. M. Ikegwu, "Parametric optimization of the production of cellulose nanocrystals (CNCs) from South African corncobs via an empirical modelling approach," *Sci. Rep.*, pp. 1–15, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-22865-y.

[8] M. I. Bhat *et al.*, "Optimizing crystallinity and particle size of cellulose nanocrystals from rice straw biomass: an integrated sonication-assisted acid hydrolysis approach," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 15, no. 19, pp. 25889–25900, 2025, doi: 10.1007/s13399-023-05195-5.

[9] A. Y. Melikoğlu, S. E. Bilek, and S. Cesur, "Optimum alkaline treatment parameters for the extraction of cellulose and production of cellulose nanocrystals from apple pomace," *Carbohydr. Polym.*, vol. 215, pp. 330–337, 2019, doi: 10.1016/j.carbpol.2019.03.103.

[10] N. Hayati, A. Rahman, B. W. Chieng, and N. A. Rahman, "Extraction and Characterization of Cellulose Nanocrystals from Tea Leaf Waste Fibers," pp. 1–11, 2017, doi: 10.3390/polym9110588.

[11] A. I. Akinjokun, L. F. Petrik, A. O. Ogunfowokan, J. Ajao, and T. V. Ojumu, "Isolation and characterization of nanocrystalline cellulose from cocoa pod husk (CPH) biomass wastes," *Heliyon*, vol. 7, no. 4, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06680.

[12] F. Kallel, F. Bettaieb, R. Khiari, A. García, and J. Bras, "Isolation and structural characterization of cellulose nanocrystals extracted from garlic straw residues," *Ind. Crop. Prod.*, vol. 87, pp. 287–296, 2016, doi: 10.1016/j.indcrop.2016.04.060.

[13] F. Hemmati, S. M. Jafari, M. Kashaninejad, and M. Barani Motlagh, "Synthesis and characterization of cellulose nanocrystals derived from walnut shell agricultural residues," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 120, pp. 1216–1224, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.012.

[14] T. W. Kurniawan, H. Sulistyarti, B. Rumhayati, and A. Sabarudin, "Cellulose Nanocrystals (CNCs) and Cellulose Nanofibers (CNFs) as Adsorbents of Heavy Metal Ions," vol. 2023, 2023, doi: 10.1155/2023/5037027.

[15] L. Xing, C. Hu, W. Zhang, L. Guan, and J. Gu, *Transition of cellulose supramolecular structure during concentrated acid treatment and its implication for cellulose nanocrystal yield*, vol. 229. Elsevier Ltd., 2020. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.115539.

[16] K. J. Nagarajan *et al.*, "A comprehensive review on cellulose nanocrystals and cellulose nanofibers: Pretreatment, preparation, and characterization," *Polym. Compos.*, vol. 42, no. 4, pp. 1588–1630, 2021.

[17] Y. Tang, H. Yang, and S. Vignolini, "Recent Progress in Production Methods for Cellulose Nanocrystals : Leading to More Sustainable Processes," vol. 2100100, 2022, doi: 10.1002/adsu.202100100.

[18] L. P. Magagula, C. M. Masemola, M. As, Z. N. Tetana, N. Moloto, and E. C. Linganiso,

"Lignocellulosic Biomass Waste-Derived Cellulose Nanocrystals and Carbon Nanomaterials : A Review," 2022.

[19] J. George and S. N. Sabapathi, "Cellulose nanocrystals: synthesis, functional properties, and applications," *Nanotechnol. Sci. Appl.*, pp. 45–54, 2015.

[20] M. Mariano, N. El Kissi, and A. Dufresne, "Cellulose Nanocrystals and Related Nanocomposites : Review of some Properties and Challenges," pp. 791–806, 2014, doi: 10.1002/polb.23490.

[21] E. Kayahan, "Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Pamukkale University Journal of Engineering Sciences Cellulose nanocrystals : Synthesis procedures and characterization techniques Selüloz Nanokristaller : Sentez p rosedürleri , karakterizasyon teknikleri," no. X, pp. 1–19, 2025, doi: 10.5505/pajes.2025.37888.

[22] Z. Wei, R. Sinko, S. Keten, and E. Luijten, "E ff ect of Surface Modi fi cation on Water Adsorption and Interfacial Mechanics of Cellulose Nanocrystals," 2018, doi: 10.1021/acsami.7b18803.

[23] M. Thakur, A. Sharma, V. Ahlawat, M. Bhattacharya, and S. Goswami, "Process optimization for the production of cellulose nanocrystals from rice straw derived a - cellulose," *Mater. Sci. Energy Technol.*, vol. 3, pp. 328–334, 2020, doi: 10.1016/j.mset.2019.12.005.

[24] D. O. Bichang'a and I. O. Oladele, "Optimization of process parameters for cellulose nanocrystals derivative from coconut shell," *Next Mater.*, vol. 9, p. 101020, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.101020.

[25] Q. Fan *et al.*, "Experiment and molecular dynamics simulation of functionalized cellulose nanocrystals as reinforcement in cement composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 341, p. 127879, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127879.

[26] R. K. Ulaganathan, N. A. Mohamad Senusi, M. A. Mohd Amin, M. K. A. Abdul Razab, A. Ismardi, and N. H. Abdullah, "Effect of cellulose nanocrystals (CNC) on PVA/CNC bio-nanocomposite film as potential food packaging application," *Mater. Today Proc.*, vol. 66, pp. 3150–3153, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.466.

[27] M. Yusefi *et al.*, "Fabrication of cellulose nanocrystals as potential anticancer drug delivery systems for colorectal cancer treatment," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 199, pp. 372–385, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.189.

[28] D. K. Patel, S. D. Dutta, J. Hexiu, K. Ganguly, and K.-T. Lim, "Bioactive electrospun nanocomposite scaffolds of poly(lactic acid)/cellulose nanocrystals for bone tissue engineering," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 162, pp. 1429–1441, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.246.

[29] J. Shojaeiarani, D. Bajwa, and A. Shirzadifar, "A review on cellulose nanocrystals as promising biocompounds for the synthesis of nanocomposite hydrogels," *Carbohydr. Polym.*, vol. 216, pp. 247–259, 2019.