

Pengembangan Sistem Pengolahan Limbah Industri Tapioka Menggunakan Membran Biokomposit Selulosa/Nanosilika dengan Sensor Kekeruhan Berbasis IoT

Muhammad Faishal Rahman¹, Firza Khaldi Alisa¹, Pradnadia Putri Hadriansyah¹, Foliatini¹, Muhammad Luthfan Haziman^{1,2}, Achmad Nandang Roziafanto^{1*}

¹)Program Studi Nanoteknologi Pangan, Politeknik AKA Bogor, Bogor, 16154, Indonesia

²)Departemen Teknologi Agroindustri, Fakultas Teknologi Agroindustri, Universitas Padjajaran, Indonesia

*E-mail: anandangr@yahoo.com

(Received: 28 Januari 2026; Accepted: 20 Juli 2026; Published: 22 Juli 2026)

Abstrak

Industri tapioka menghasilkan limbah cair dalam jumlah besar dengan kandungan *Total Suspended Solids* (TSS) dan kekeruhan yang tinggi sehingga berpotensi mencemari lingkungan perairan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pengolahan limbah cair tapioka menggunakan membran biokomposit selulosa/nanosilika yang terintegrasi dengan sensor kekeruhan berbasis *Internet of Things* (IoT). Nanosilika berbasis sekam padi diisolasi melalui proses karbonisasi dan perlakuan asam, sedangkan membran disintesis menggunakan metode *solvent casting*. Membran yang dihasilkan memiliki ukuran pori rata-rata 0,56 μm dan porositas sebesar 93,53%, sehingga proses pemisahan berlangsung melalui mekanisme *microfiltration* (MF). Hasil pengujian kinerja menunjukkan fluks awal sebesar 348,73 L/m²·jam yang menurun menjadi 160,63 L/m²·jam setelah 30 menit filtrasi akibat terbentuknya fouling pada permukaan membran. Membran mampu menurunkan kekeruhan hingga 50,88% dan TSS hingga 68,39% setelah tiga siklus filtrasi, dengan peningkatan efisiensi yang konsisten pada setiap siklus. Kinerja pemisahan dipengaruhi oleh kombinasi mekanisme *size exclusion*, pembentukan lapisan *cake*, dan adsorpsi pada gugus aktif membran. Selain itu, sensor kekeruhan berbasis IoT menunjukkan kesesuaian yang baik dengan turbidimeter standar dan menghasilkan model kalibrasi kuadratik dengan koefisien determinasi (R^2) lebih dari 0,99, sehingga memungkinkan pemantauan kualitas air secara *real-time*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi membran biokomposit selulosa/nanosilika dan sistem pemantauan berbasis IoT berpotensi menjadi alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk pengolahan limbah cair industri tapioka.

Kata kunci: membran biokomposit; nanosilika; limbah cair tapioka; sensor kekeruhan; *Internet of Things*

Abstract

The tapioca industry generates large volumes of wastewater containing high levels of Total Suspended Solids (TSS) and turbidity, which may pose significant risks to aquatic environments. This study aimed to develop a tapioca wastewater treatment system using a cellulose/nanosilica biocomposite membrane integrated with an Internet of Things (IoT)-based turbidity sensor. Rice husk-derived nanosilica was isolated through carbonization and acid treatment processes, while the membrane was fabricated using the solvent casting method. The resulting membrane exhibited an average pore diameter of 0.56 μm and a porosity of 93.53%, corresponding to a microfiltration (MF) mechanism. Performance evaluation showed an initial flux of 348.73 L m⁻² h⁻¹, which gradually decreased to 160.63 L m⁻² h⁻¹ after 30 min of filtration due to fouling formation during operation. The membrane achieved turbidity and TSS removal efficiencies of 50.88% and 68.39%, respectively, after three consecutive filtration cycles, with a consistent improvement in removal performance across cycles. The separation process was governed by a combination of size exclusion, cake layer formation, and adsorption on the active functional groups of cellulose and nanosilica. In addition, the IoT-based turbidity sensor demonstrated good agreement with a standard turbidity meter and produced a quadratic calibration model with a coefficient of determination (R^2) greater than 0.99, enabling real-time water quality monitoring. These findings indicate that the integration of a cellulose/nanosilica biocomposite membrane with an IoT-based monitoring system represents a promising and environmentally sustainable approach for industrial tapioca wastewater treatment.

Keyword: biocomposite membrane; nanosilica; tapioca wastewater; turbidity sensor; Internet of Things

PENDAHULUAN

Industri tapioka merupakan salah satu sektor agroindustri yang berkembang pesat di Indonesia dan tersebar luas mulai dari skala rumah tangga hingga industri besar. Kota Bogor tercatat sebagai salah satu wilayah dengan jumlah usaha skala kecil penghasil tapioka terbanyak. Aktivitas industri ini menghasilkan limbah cair dalam jumlah besar yang berpotensi mencemari lingkungan sekitar, terutama di wilayah Bogor Utara. Menurut Andareswari *et al.* (2019), volume limbah cair yang dihasilkan mencapai 19,125 m³ per ton tapioka, yang berasal dari berbagai tahapan proses seperti pencucian, ekstraksi, dan pengendapan pati.

Limbah cair industri tapioka umumnya memiliki karakteristik warna putih kekuningan, bau menyengat, serta kandungan Total Suspended Solids (TSS) yang sangat tinggi. Di Bogor Utara, nilai TSS rata-rata tercatat sebesar 1.403,18 mg/L, jauh melebihi baku mutu maksimum yang diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014, yaitu sebesar 100 mg/L (Andareswari *et al.*, 2019). Tingginya kandungan TSS menyebabkan kekeruhan yang signifikan dan mencerminkan tingkat pencemaran yang serius terhadap lingkungan perairan.

Berbagai teknologi pengolahan limbah telah diteliti dan dikembangkan, di antaranya *Anaerobic Baffled Reactor* (ABR), fotokatalisis, dan *Sequencing Batch Reactor* (SBR). Namun, setiap teknologi tersebut memiliki keterbatasan dalam penerapannya. ABR memiliki kelemahan berupa distribusi influen yang tidak merata (Tilche & Vieira, 1991), fotokatalisis membutuhkan konsumsi energi tinggi (Sucahya *et al.*, 2016), sedangkan SBR hanya efektif untuk volume kecil dan bersifat tidak kontinu. Dengan demikian, diperlukan pendekatan baru yang lebih efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan.

Salah satu alternatif yang menjanjikan adalah sistem filtrasi berbasis membran mikrofiltrasi, yang mampu menyaring partikel tersuspensi tanpa mengganggu kandungan biologis penting dalam air limbah (Djana *et al.*, 2024). Teknologi membran ini menawarkan efisiensi tinggi, konsumsi energi rendah, serta pengoperasian yang tidak menghasilkan limbah sekunder. Meskipun demikian, penggunaan bahan membran sintesis seperti *polyethersulfone* (PES) dan *polysulfone* (PSF) masih menghadapi kendala berupa biaya tinggi, rendahnya biodegradabilitas, dan potensi toksisitas. Oleh karena itu, biopolimer seperti selulosa menjadi alternatif menarik dalam pengembangan material membran yang lebih ramah lingkungan.

Selulosa merupakan polisakarida linier yang tersusun atas unit D-glukopiranosida dan terhubung melalui ikatan β -(1,4)-glikosidik, dengan rumus molekul umum (C₆H₁₀O₅)_x. Senyawa ini merupakan biopolimer paling melimpah di bumi,

dengan estimasi produksi global mencapai 10¹¹ hingga 10¹² ton per tahun (González-García, 2018). Microcrystalline cellulose (MCC), salah satu turunan selulosa dengan kristalinitas tinggi, memiliki stabilitas mekanik yang baik dan gugus hidroksil aktif yang melimpah, sehingga berpotensi sebagai bahan pengisi (filler) dalam komposit membran (Sharma *et al.*, 2019; Nazri *et al.*, 2021).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan MCC pada membran polimer dapat meningkatkan kinerja filtrasi. Pramono *et al.* (2022) melaporkan bahwa penambahan MCC dari tandan kosong kelapa sawit ke dalam membran PVDF meningkatkan fluks air dan efisiensi rejeksi asam humat. Hal serupa dilaporkan oleh Nazri *et al.* (2021), yang mengintegrasikan MCC komersial ke dalam membran PES dan menghasilkan peningkatan fluks yang signifikan serta efisiensi rejeksi yang tinggi. Meskipun demikian, kapasitas adsorpsi MCC masih perlu ditingkatkan, salah satunya melalui penambahan material anorganik berpori seperti nanosilika. Nanosilika dapat diperoleh dari limbah pertanian seperti sekam padi yang mengandung silika hingga 97% (Handayani *et al.*, 2014; Fathurrohman *et al.*, 2023). Kombinasi MCC dan nanosilika dalam membran komposit dapat meningkatkan porositas, kekuatan mekanik, serta daya filtrasi membran (Waleed *et al.*, 2024; Miri *et al.*, 2021).

Untuk mendukung sistem ini secara real-time, penerapan sensor turbiditas berbasis Internet of Things (IoT) menjadi penting. Sensor ini mampu memantau kekeruhan yang berkorelasi langsung dengan kandungan TSS dalam limbah cair (Hartiwi, 2024). Teknologi IoT juga memungkinkan pemantauan data secara digital, efisien, dan berkesinambungan (Delwizar *et al.*, 2021; Iskandar *et al.*, 2019), sejalan dengan konsep Industry 4.0 dan Society 5.0.

Meskipun penelitian mengenai membran berbasis selulosa dan nanosilika telah banyak dilaporkan secara terpisah, hingga saat ini belum terdapat kajian yang mengintegrasikan membran biokomposit selulosa/nanosilika dengan sistem pemantauan berbasis IoT secara terpadu, khususnya untuk aplikasi pengolahan limbah cair industri tapioka. Membran berbasis biopolimer umumnya dikembangkan tanpa disertai sistem kontrol kualitas efluen secara *real-time*, sehingga efektivitasnya sulit dipantau secara langsung di lapangan. Di sisi lain, sistem IoT yang telah dikembangkan untuk pemantauan kualitas air sebagian besar diterapkan pada air bersih atau air permukaan, bukan pada limbah industri dengan beban polutan tinggi seperti limbah tapioka (Delwizar *et al.*, 2021; Iskandar *et al.*, 2019).

Kesenjangan inilah yang menjadi landasan penelitian ini. Penelitian ini menghadirkan sistem pengolahan limbah terpadu yang menggabungkan keunggulan membran biokomposit

selulosa/nanosilika sebagai media filtrasi dengan sensor kekeruhan berbasis IoT sebagai unit pemantauan otomatis, sehingga menghasilkan solusi yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan untuk pengelolaan limbah cair industri tapioka.

METODOLOGI

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini meliputi sensor turbiditas, turbidimeter Lutron TU-2016, vacuum Buchner, pompa vakum Heidolph, oven Memmert, dan tanur Thermo Fisher Scientific. Bahan yang digunakan pada penelitian ini meliputi NaOH, akuades, H₂O₂, HCl, *polyvinyl acetate* (PVAc), *polyvinyl alcohol* (PVA), *polyethylene glycol* (PEG), sekam padi yang berasal dari daerah Cianjur, Jawa Barat, serta limbah cair industri tapioka yang bersumber dari Industri Tapioka Bapak Haji Lili, yang berlokasi di Kecamatan Tanah Baru, Kota Bogor.

Isolasi Nanosilika dari Sekam Padi

Prosedur dilakukan merujuk pada penelitian Wibowo *et al.* (2022). Sekam padi disiapkan tanpa perlakuan awal khusus, lalu diarangkan pada suhu 300°C selama 1 jam untuk mendapatkan arang sekam padi. Kemudian, HCl 1N ditambahkan ke dalam abu sekam padi dan dipanaskan pada suhu 80°C selama 1 jam di atas hotplate sambil diaduk. Campuran disimpan pada suhu kamar selama 24 jam, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 2 jam. Selanjutnya, campuran dipanaskan dalam tanur pada suhu 800°C. Hasil akhir berupa bubuk putih nanosilika.

Sintesis Bionanokomposit

Sintesis membran berbasis komposit selulosa/nanosilika dilakukan menggunakan metode solvent casting. Bubuk selulosa mikrokristalin (MCC) dan PEG ditambahkan dengan perbandingan 4:1 ke dalam 170 mL akuades, kemudian ditambahkan 5 gram PVA dan 10 gram PVAc, lalu diaduk menggunakan hotplate magnetic stirrer pada suhu 85°C hingga homogen. Larutan yang telah homogen ditambahkan dengan larutan nanosilika yang dibuat dari 3 gram nanosilika yang dilarutkan dalam 60 mL NaOH 1%. Larutan campuran dihomogenkan kembali dan dituangkan pada cetakan spesimen dengan jumlah volume tertentu. Selanjutnya, pelarut diuapkan dengan bantuan pengeringan oven pada suhu 40°C hingga kering.

Karakterisasi Morfologi Membran

Morfologi permukaan membran komposit dianalisis menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Sampel membran dipotong dan disiapkan sesuai prosedur SEM. Ukuran pori diukur menggunakan ImageJ dengan mengambil 25 garis acak yang mewakili pori dari citra SEM untuk menghitung rata-rata diameter pori.

Karakterisasi Ukuran Partikel Nanosilika

Distribusi ukuran partikel nanosilika dianalisis menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA). Nanosilika dilarutkan dalam akuades dan disonikasi sebelum dianalisis. Hasil pengukuran menunjukkan ukuran partikel rata-rata dan indeks polidispersitas (PDI).

Uji Porositas

Porositas membran dihitung dengan menentukan perbandingan volume pori terhadap volume total membran. Perhitungan porositas dilakukan dengan menguji penyerapan air pada membran (water uptake) dan mengukur ketebalan membrannya. Berat awal sampel yang akan diuji ditimbang (W_0) dan diukur ketebalannya dengan mikrometer. Sampel membran dimasukkan ke dalam wadah plastik, lalu diisi akuades, ditutup, dan didiamkan selama 24 jam. Setelah itu, sampel diangkat dan ditimbang berat sampel basah (W). Nilai porositas dihitung dengan persamaan berikut:

$$\text{Porositas (\%)} = \frac{w_1 - w_2}{\rho_w \cdot V_t} \times 100\%$$

Keterangan:

- w_1 = massa basah (g)
- w_2 = massa kering (g)
- ρ_w = densitas air (g/cm³)
- V_t = volume membran (cm³)

Uji Fluks

Uji fluks dilakukan dengan mengalirkan air limbah melalui membran yang telah dipasang pada perangkat filtrasi. Limbah dialirkan pada tekanan vakum 1,5 bar. Volume air yang melewati membran ditampung pada gelas ukur dan dicatat setiap 5 menit sekali hingga menit ke-30. Nilai fluks total dihitung dengan persamaan:

$$J = \frac{V}{A \cdot t}$$

Keterangan:

- J = fluks (L/m²·jam)
- V = volume permeat (L)
- A = luas efektif membran (m²)
- t = waktu (jam)

Uji Total Fouling

Penentuan ketahanan fouling membran dilakukan dengan cara menguji membran menggunakan limbah cair tapioka. Nilai fluks air ditentukan selama 10 menit (J_w). Setelah diperoleh nilai J_w , air di dalam perangkat filtrasi diganti dengan limbah cair tapioka. Filtrasi dilakukan selama 10 menit dan volume permeat yang diperoleh dicatat (J_p). Setelah diperoleh fluks J_p , larutan umpan diganti dengan air dan proses filtrasi dilakukan selama 10 menit untuk ditentukan nilai fluksnya. Total *fouling* pada

membran dapat ditentukan dengan persamaan berikut (Susanto & Ulbricht, 2009):

$$R_t = \frac{J_w - J_p}{J_w} \times 100\%$$

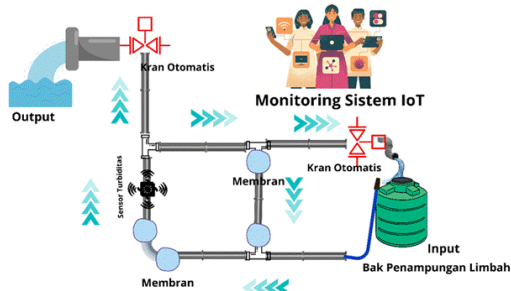
Keterangan:

- R_t = total *fouling* (%)
 J_w = fluks air murni sebelum filtrasi (L/m²·jam)
 J_p = fluks permeat setelah filtrasi (L/m²·jam)

Uji Efisiensi Membran terhadap Penurunan kadar TSS dan Kekeruhan

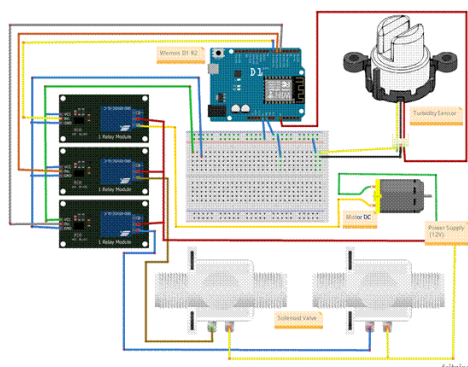
Pengujian dilakukan menggunakan limbah cair tapioka dan sebuah membran berukuran 7×7 cm. Hasil filtrasi dianalisis dengan Turbidimeter Lutron TU-2016 dan berdasarkan nilai TSS nya. Filtrasi dilakukan hingga tiga kali sehingga diperoleh hasil filtrasi 1×, 2×, dan 3×. Persentase efektivitas dihitung dengan menghitung perubahan nilainya. Pengukuran dilakukan sebanyak triplo.

Rangkaian sistem pengolahan limbah secara keseluruhan dirancang secara terpadu antara unit filtrasi membran dan sistem pemantauan berbasis IoT, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian Sistem Pengolahan Limbah

Sensor turbiditas SEN0189 dirangkai bersama Wemos D1 R2 sebagai mikrokontroler dan selenoid valve sebagai aktuator, dengan skema rangkaian yang ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian Sensor Turbiditas

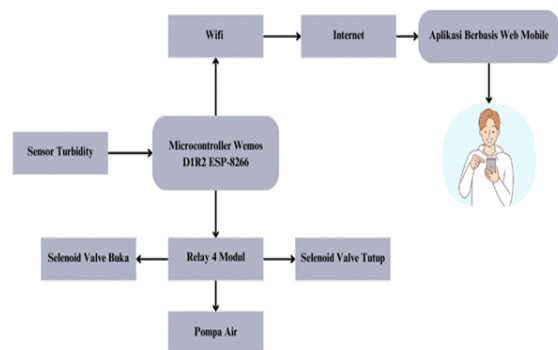
Perancangan *prototype* pengukuran kejernihan ini menggunakan sensor turbiditas SEN0189 sebagai pengukur kejernihan air limbah. Selenoid valve berfungsi sebagai pintu untuk mengalirkan air limbah yang telah melewati membran. Wemos D1 R2 berfungsi sebagai *microcontroller* yang menghubungkan alat dengan WiFi sehingga air dapat dimonitoring melalui *smartphone*.

Langkah-langkah kerja alat dimulai dengan mengisi air limbah ke dalam bak penampung awal. Sensor turbiditas akan mengukur kekeruhan air limbah setelah melewati membran dalam bentuk analog dan akan memberikan sinyal jika air limbah telah memenuhi syarat kekeruhan yang sudah ditetapkan untuk membuka selenoid valve sehingga air akan keluar ke bak penampungan akhir. Sebaliknya, jika kekeruhan air limbah tidak memenuhi syarat maka selenoid valve akan menutup sehingga air limbah akan kembali melewati membran filtrasi. Kemudian Wemos D1 R2 akan mengirimkan data ke *web server* untuk dapat diakses oleh pengguna dalam bentuk satuan kejernihan air, yaitu NTU.

Terkait baku mutu nilai kekeruhan (NTU) yang disetting pada alat ditetapkan sesuai kondisi, karena tidak ada standar baku mutu yang mengatur batasan kekeruhan pada limbah cair industri tapioka.

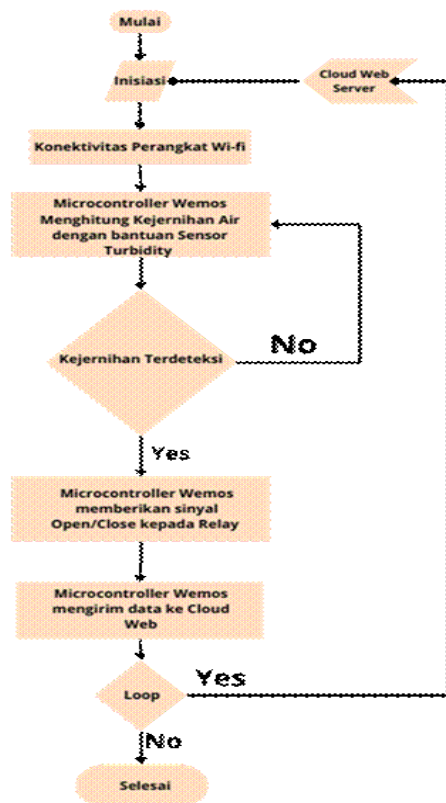
Rancangan Arsitektur Sistem

Pada sistem ini terdapat *turbidity sensor* sebagai unit sensor, *microcontroller* sebagai unit pemroses, *relay* dan pompa sebagai unit penggerak, modul WiFi dengan *router/modem/hotspot* ke internet sebagai unit pengirim, serta *smartphone* dan pengguna sebagai unit penerima. Arsitektur sistem secara keseluruhan sebagaimana digambarkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Rancangan Arsitektur Sistem

Alur kerja pemrograman perangkat lunak sistem IoT dirancang untuk memungkinkan pemantauan dan pengendalian otomatis kualitas air limbah secara real-time. Diagram alir pemrograman selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Flowchart Software

Kalibrasi Sensor Turbiditas

Kurva standar dalam analisis Turbidity Spektrofotometer dibuat dari limbah cair tapioka murni yang dibuat beberapa variasi konsentrasi mulai dari 25 mL; 20 mL; 15 mL; 10 mL; 5 mL; 2,5 mL; 1 mL; dan 0 mL limbah cair tapioka murni dalam 25 mL akuades. Scanning dilakukan pada rentang 0–1000 NTU. Deret standar tersebut kemudian diukur dengan sensor turbiditas dengan *output voltage* (V). Grafik antara NTU dengan nilai volt dihubungkan dengan persamaan polinomial derajat dua sehingga didapat batasan atas dan bawah nilai volt pada pengukuran sensor.

Pengukuran Nilai Kekeruhan

Selain diukur dengan menggunakan sensor otomatis, pengukuran kekeruhan juga dilakukan dengan metode spektrofotometri menggunakan turbidimeter yang terkalibrasi. Prosedur pengujian merujuk pada penelitian Zakaria *et al.*, (2021). Contoh uji dibandingkan dengan larutan standar secara visual. Contoh uji ditambahkan ke dalam botol yang telah disediakan hingga mencapai tanda tera dan dihomogenkan, kemudian diukur dengan turbidimeter. Pengukuran dilakukan dua kali ulangan (duplo).

Pengukuran Kadar *Total Dissolved Solid* (TDS)

Prosedur pengujian merujuk pada penelitian Zakaria *et al.*, 2021. Pengukuran kadar total TDS dilakukan dengan metode konduktometri menggunakan TDS meter. Contoh uji ditambahkan kedalam gelas piala dan dihomogenkan, kemudian diukur kadar TDS nya dengan TDS meter yang telah dikalibrasi. Pengukuran dilakukan sebanyak dua kali ulangan (duplo).

Pengukuran Kadar *Total Solid* (TS)

Pengujian kadar total solid dilakukan dengan metode gravimetri. Contoh uji diambil sebanyak 50 mL ke dalam pinggan penguap yang telah dikeringkan dan ditimbang sebelumnya (B). Pinggan penguap yang telah berisi contoh uji diuapkan di atas bunsen hingga kering dan dimasukkan ke dalam oven pada suhu (100–105)°C selama 1 jam kemudian ditimbang hingga mencapai bobot tetap (A). Pengujian dilakukan duplo. Kadar total solid dapat dihitung dengan rumus:

$$TS \text{ (mg/L)} = \frac{(B - A) \times 1000 \frac{\text{mL}}{\text{L}}}{\text{Volume contoh uji (mL)}}$$

Keterangan:

- A = berat pinggan penguap setelah pemanasan (mg)
- B = berat pinggan penguap sebelum pemanasan (mg)

Perhitungan Kadar *Total Suspended Solid* (TSS)

Total suspended solid (TSS) merupakan hasil selisih dari *total solid* (TS) dan *total dissolved solid* (TDS). Kadar total suspended solid (TSS) dapat dihitung menggunakan rumus :

$$TSS \text{ (mg/L)} = TS \text{ (mg/L)} - TDS \text{ (mg/L)}$$

Perhitungan Efisiensi Penurunan Kadar TSS dan Kekeruhan

Nilai efisiensi penurunan dapat dihitung dengan persamaan:

$$R = \frac{C_{awal} - C_{akhir}}{C_{awal}} \times 100\%$$

Keterangan :

- R = efisiensi penurunan (%)
- C_{awal} = konsentrasi sebelum filtrasi (mg/L)
- C_{akhir} = konsentrasi sesudah filtrasi (mg/L)

Uji Statistika

Akurasi sensor turbiditas dievaluasi dengan membandingkan hasil pengukuran sensor dan turbidity meter standar pada berbagai tingkat konsentrasi sampel. Data yang diperoleh terlebih dahulu diuji normalitasnya untuk memenuhi asumsi analisis parametrik. Selanjutnya, perbedaan antara kedua metode pengukuran dianalisis menggunakan paired sample t-test pada tingkat signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$). Analisis dilakukan untuk menentukan kesesuaian hasil pengukuran sensor terhadap instrumen referensi sebagai dasar evaluasi performa sensor dalam pemantauan kekeruhan limbah cair.

HASIL DAN PEMBAHASAN

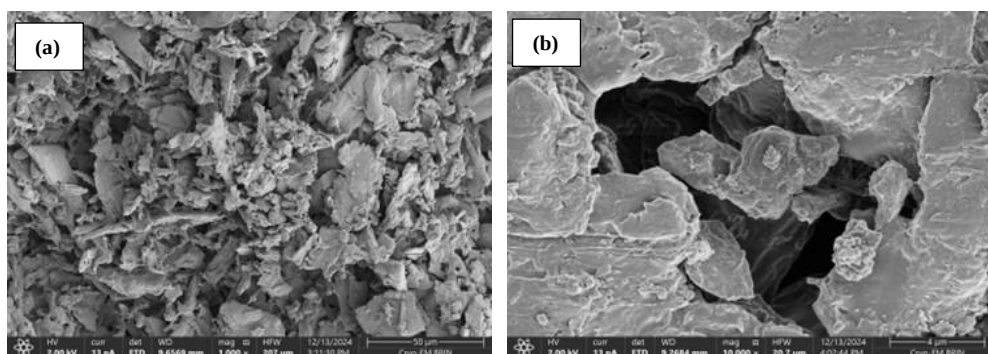
Karakterisasi Nanosilika

Karakterisasi nanosilika hasil isolasi dari sekam padi dilakukan untuk mengetahui kualitas dan kesesuaian material yang dihasilkan sebagai pengisi dalam matriks membran biokomposit. Hasil pengukuran menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) menunjukkan ukuran partikel rata-rata sebesar 714 nm dengan indeks polidispersitas (PDI) sebesar 0,00921. Nilai PDI yang sangat rendah ini mengindikasikan distribusi ukuran partikel yang seragam dan homogen dalam dispersi. Wibowo *et al.* (2022) melaporkan bahwa ukuran partikel nanosilika berbasis sekam padi sangat dipengaruhi oleh suhu kalsinasi, konsentrasi perlakuan asam, serta asal geografis sekam padi yang digunakan, sehingga variasi ukuran partikel antarpelitian merupakan hal yang lazim.

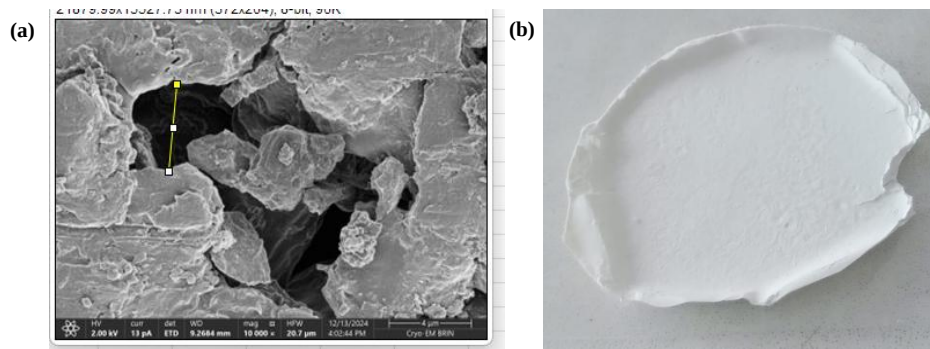
Meskipun ukuran 714 nm secara teknis berada di atas rentang nanopartikel konvensional (1–100 nm), Ijaz *et al.* (2025) menegaskan bahwa silika berbasis sekam padi tetap memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, struktur mesopori, serta gugus silanol (Si–OH) aktif di permukaan yang berperan dalam mekanisme adsorpsi, sehingga istilah nanosilika dalam konteks penelitian ini mengacu pada sifat fungsional dan metode sintesisnya, bukan semata-mata pada dimensi ukuran partikel. Dengan demikian, nanosilika yang dihasilkan dalam penelitian ini dinilai layak sebagai pengisi fungsional dalam matriks membran biokomposit.

Karakterisasi Morfologi dan Ukuran Pori Membran

Karakterisasi morfologi dilakukan untuk memahami struktur fisik membran yang terbentuk serta kesesuaiannya dengan aplikasi mikrofiltrasi limbah tapioka. Hasil pengamatan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan bahwa permukaan membran tampak tidak homogen pada perbesaran rendah (Gambar 5a), dengan distribusi partikel yang tidak merata serta adanya fragmen berpori yang mengindikasikan terjadinya agregasi nanosilika. Pada perbesaran tinggi (Gambar 5b), struktur pori terlihat lebih jelas dengan rata-rata diameter pori sebesar 0,56 μm berdasarkan analisis menggunakan perangkat lunak ImageJ sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6a. Secara fisik, membran yang dihasilkan tampak homogen dan fleksibel tanpa retakan makroskopis (Gambar 6b).



Gambar 5. Morfologi Membran menggunakan SEM dengan skala 50 mikrometer (a) dan 4 mikrometer (b)



Gambar 6. Analisis Ukuran Diameter Pori-Pori Membran dengan ImageJ (a) dan Pengamatan Fisik Membran (b)

Kaur *et al.* (2023) melaporkan bahwa rentang ukuran pori 0,1–1,0 μm merupakan rentang optimal untuk sistem mikrofiltrasi dalam menekan perkembangan fouling sekaligus mempertahankan efisiensi filtrasi partikel tersuspensi. Kesesuaian ukuran pori ini semakin diperkuat jika mempertimbangkan ukuran granul pati tapioka sebagai kontaminan utama yang berukuran 10–25 μm (Ng & Henry, 2020), dengan nilai median sekitar 15,6 μm (Molenda *et al.*, 2006), sehingga rasio ukuran partikel target terhadap diameter pori membran mencapai lebih dari 17:1. Dengan demikian, membran yang dihasilkan memiliki struktur pori yang sesuai untuk menahan granul pati tapioka secara mekanis melalui mekanisme size exclusion, yang menjadi landasan kinerja filtrasi pada tahapan pengujian selanjutnya.

Uji Porositas

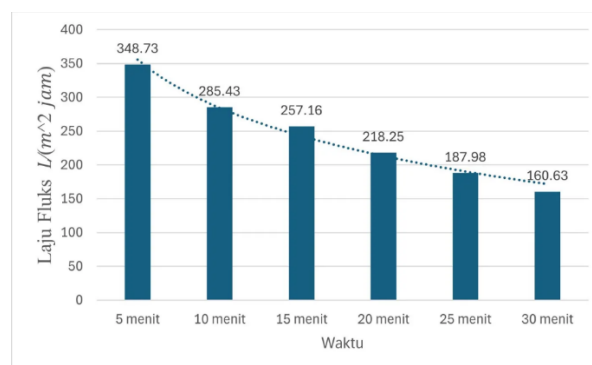
Uji porositas dilakukan untuk mengkuantifikasi pengaruh penambahan nanosilika terhadap struktur ruang pori membran yang terbentuk. Hasil pengujian menunjukkan nilai porositas membran biokomposit selulosa/nanosilika mencapai 93,53%. Nazri *et al.* (2021) melaporkan bahwa penambahan MCC pada membran PES secara signifikan meningkatkan porositas dan fluks membran dibandingkan membran tanpa pengisi, sementara Miri *et al.* (2021) mengonfirmasi bahwa penambahan nanosilika ke dalam matriks polimer meningkatkan porositas melalui pembentukan jalur aliran tambahan akibat celah antarmuka antara partikel silika dan matriks polimer.

Tingginya nilai porositas menunjukkan bahwa keberadaan nanosilika berkontribusi terhadap terbentuknya struktur membran yang berpori sehingga ikut meningkatkan sisi aktif untuk interaksi dengan partikel polutan (Ijaz *et al.*, 2025). Dengan demikian, nilai porositas 93,53% ini menjadi landasan dalam memahami karakteristik fluks dan kinerja filtrasi membran yang dibahas pada sub-bagian berikutnya.

Uji Fluks dan Total Fouling

Uji fluks dan total fouling dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan transport massa membran serta ketahanannya terhadap deposisi partikel selama proses filtrasi limbah tapioka berlangsung. Hasil pengujian menunjukkan laju fluks awal sebesar 348,73 $\text{L/m}^2\cdot\text{jam}$ pada menit ke-5 yang menurun secara bertahap hingga 160,63 $\text{L/m}^2\cdot\text{jam}$ pada menit ke-30 (Gambar 7), merepresentasikan penurunan fluks sebesar 53,9% selama 30 menit operasi. Adapun hasil pengujian total fouling menunjukkan nilai R_t sebesar 59,99%, diperoleh dari perbandingan antara fluks air murni

($J_w = 713,40 \text{ L/m}^2\cdot\text{jam}$) dan fluks permeat limbah tapioka pada menit ke-10 ($J_p = 285,43 \text{ L/m}^2\cdot\text{jam}$) menggunakan persamaan Susanto & Ulbricht (2009).



Gambar 7. Grafik Uji Fluks

Joshi *et al.* (2023) melaporkan bahwa penurunan fluks yang bersifat bertahap pada membran nanostruktur selulosa mengindikasikan dominasi mekanisme cake filtration, di mana lapisan residu partikel yang terbentuk secara bertahap justru berfungsi sebagai lapisan filtrasi tambahan yang meningkatkan efisiensi rejeksi partikel. Nilai R_t sebesar 59,99% yang cukup tinggi ini konsisten dengan karakteristik limbah tapioka yang memiliki kandungan TSS awal sebesar 989,70 mg/L , namun hidrofilisitas tinggi membran akibat gugus silanol (Si-OH) nanosilika dan gugus hidroksil selulosa berpotensi mendukung pemulihan fluks melalui pencucian hidrolis sederhana sebagaimana dilaporkan Ijaz *et al.* (2025). Dengan demikian, profil fluks dan nilai fouling yang diperoleh mencerminkan perilaku membran yang wajar untuk sistem mikrofiltrasi limbah organik berpartikel tinggi, sekaligus mengindikasikan perlunya optimasi siklus pencucian pada pengembangan sistem skala industri.

Efisiensi Penurunan Kekeruhan dan TSS

Uji efisiensi dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan membran dalam menurunkan dua parameter kualitas air utama pada limbah tapioka, yaitu kekeruhan dan TSS, melalui tiga siklus filtrasi berulang. Data kinerja membran dalam penurunan kekeruhan dan TSS pada berbagai siklus filtrasi disajikan pada Tabel 1.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa efisiensi penurunan kekeruhan meningkat secara bertahap dari 41,03% pada siklus pertama menjadi 50,88% pada siklus ketiga. Pola yang sama juga terjadi pada parameter TSS dengan peningkatan efisiensi dari 52,91% menjadi 68,39% (Gambar 8). Hasil perbandingan pengukuran antara turbidity meter standar dan sensor turbiditas berbasis IoT

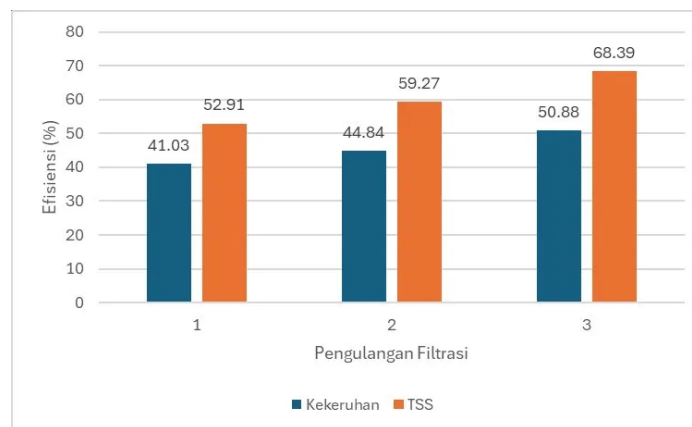
beserta hasil analisis statistik disajikan pada Tabel 2.

Peningkatan efisiensi pada filtrasi berulang menunjukkan terbentuknya lapisan cake pada permukaan membran yang berperan sebagai lapisan filtrasi sekunder sehingga mempersempit jalur aliran dan meningkatkan kemampuan retensi partikel (Joshi *et al.*, 2023). Kinerja pemisahan ini berlangsung melalui kombinasi mekanisme *size*

exclusion, *depth filtration*, dan adsorpsi permukaan. Mekanisme *size exclusion* menjadi mekanisme dominan karena ukuran granul pati tapioka (10–25 μm) jauh lebih besar dibandingkan diameter pori membran (0,56 μm), sehingga sebagian besar partikel tersuspensi tertahan secara fisik.

Tabel 1. Kinerja Membran dalam Penurunan Kekeruhan dan TSS pada Berbagai Siklus Filtrasi (n = 3)

Siklus Filtrasi	Kekeruhan (NTU)	Efisiensi Kekeruhan (%)	TSS (mg/L)	Efisiensi TSS (%)
Awal	1089,67	–	989,70	–
1×	642,60 ± 0,61	41,03	466,07 ± 1,42	52,91
2×	601,07 ± 0,95	44,84	403,07 ± 1,38	59,27
3×	535,30 ± 0,92	50,88	312,87 ± 2,92	68,39



Gambar 8. Hasil Uji Efisiensi Kekeruhan dan TSS

Tabel 2. Uji Statistika Kekeruhan Turbidity Meter (A) dan Sensor Turbiditas (B)

Konsentrasi (%)	A (NTU)	B (NTU)
4.00	28,64	28,12
10.00	67,49	66,92
20.00	153,20	154,64
40.00	397,27	398,01
100.00	1089,67	1092,43
Normality Test	0,072 (P-Value > 0,05)	0,073 (P-Value > 0,05)
Paired T-Test	0,287 (P-Value > 0,05)	

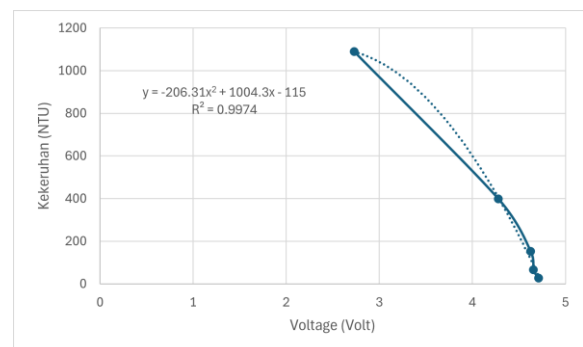
Sementara itu, partikel koloid berukuran lebih kecil dapat direduksi melalui interaksi dengan gugus hidroksil selulosa dan gugus silanol (Si-OH) nanosilika yang menyediakan situs adsorpsi aktif melalui ikatan hidrogen maupun interaksi elektrostatik (Ijaz *et al.*, 2025). Efisiensi penurunan TSS yang secara konsisten lebih tinggi dibandingkan kekeruhan mengindikasikan bahwa membran lebih efektif menahan partikel tersuspensi berukuran besar dibandingkan partikel koloid penyebab kekeruhan. Meskipun nilai TSS akhir setelah tiga siklus filtrasi masih sebesar 312,87 mg/L dan belum memenuhi baku mutu 100 mg/L berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014, tren peningkatan efisiensi yang konsisten menunjukkan bahwa membran biokomposit selulosa/nanosilika memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut melalui optimasi kondisi operasi atau integrasi dengan proses pengolahan lanjutan.

Kinerja Sensor Turbiditas Berbasis IoT

Sensor turbiditas berbasis IoT yang dikembangkan menunjukkan respons yang stabil dan konsisten terhadap variasi tingkat kekeruhan sampel. Hasil kalibrasi sensor turbiditas ditampilkan pada Gambar 9, yang menunjukkan adanya peningkatan nilai keluaran sensor seiring dengan meningkatnya konsentrasi suspensi dalam sampel. Pola ini mengindikasikan bahwa sensor mampu mendeteksi perubahan intensitas hamburan cahaya yang dihasilkan oleh partikel tersuspensi secara baik.

Trevathan *et al.* (2022) melaporkan bahwa hubungan antara sinyal keluaran dan nilai kekeruhan pada sensor turbiditas berbasis IoT umumnya bersifat non-linier akibat fenomena hamburan dan absorpsi cahaya yang semakin kompleks pada konsentrasi partikel tinggi, sehingga pendekatan regresi kuadratik lebih representatif dibandingkan model linier. Temuan tersebut sejalan dengan hasil penelitian ini, di mana model kuadratik

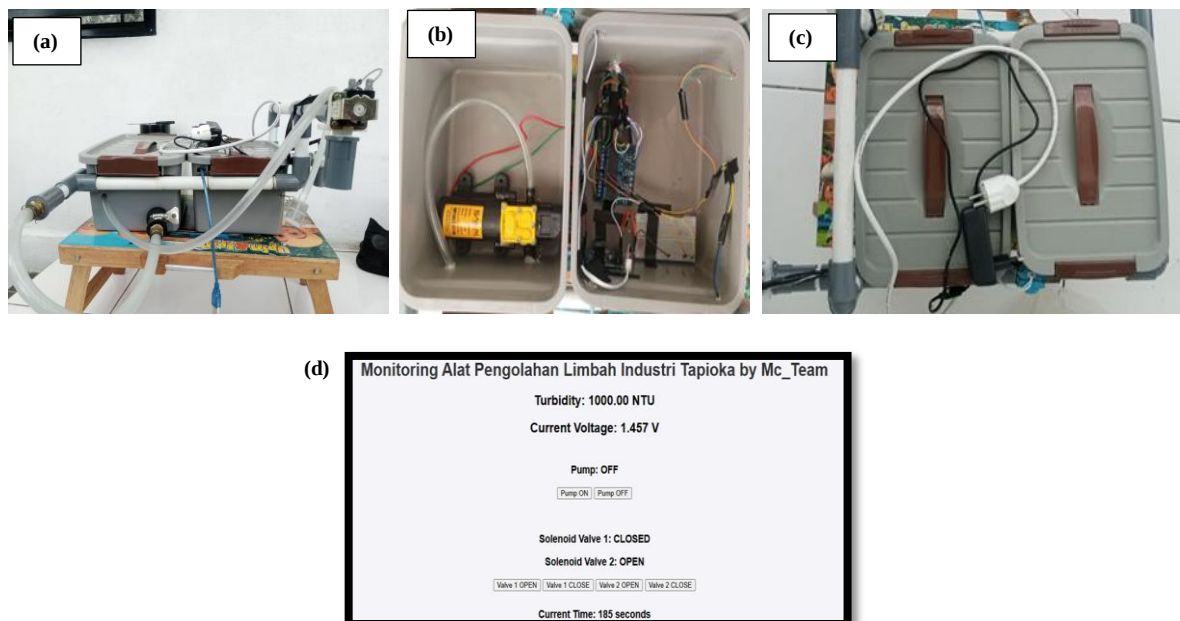
mampu menggambarkan hubungan antara respons sensor dan nilai kekeruhan dengan tingkat kesesuaian yang lebih baik pada rentang pengukuran yang digunakan.



Gambar 9. Kurva Kalibrasi Sensor Turbiditas

Untuk mengevaluasi tingkat akurasi sensor yang dikembangkan, dilakukan perbandingan hasil pengukuran antara sensor turbiditas dan turbidity meter standar pada berbagai tingkat konsentrasi sampel. Hasil analisis statistik menunjukkan bahwa data dari kedua instrumen berdistribusi normal berdasarkan uji normalitas ($p > 0,05$). Selanjutnya, uji *paired t-test* menghasilkan nilai signifikansi sebesar 0,287 ($p > 0,05$), yang menunjukkan tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara hasil pengukuran sensor dan alat standar.

Hasil ini mengindikasikan bahwa sensor turbiditas berbasis IoT yang dikembangkan memiliki tingkat akurasi yang memadai dan mampu memberikan hasil pengukuran yang sebanding dengan instrumen referensi. Selain itu, integrasi sensor dengan platform monitoring berbasis web memungkinkan proses pemantauan kualitas limbah dilakukan secara real-time sehingga mendukung penerapan sistem pengolahan limbah yang lebih efisien dan terkontrol. Pengamatan fisik alat dan halaman utama monitoring *website* Wemos dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Pengamatan Fisik Alat (a-c) dan Halaman Utama WebSite Monitoring (d)

KESIMPULAN

Membran biokomposit selulosa/nanosilika berbasis sekam padi berhasil difabrikasi dengan ukuran pori rata-rata $0,56 \mu\text{m}$ dan porositas 93,53%. Membran menunjukkan kinerja mikrofiltrasi yang baik terhadap limbah cair tapioka dengan efisiensi penurunan kekeruhan dan TSS masing-masing mencapai 50,88% dan 68,39% setelah tiga siklus filtrasi. Kinerja pemisahan dipengaruhi oleh mekanisme size exclusion, pembentukan lapisan cake, dan adsorpsi pada gugus aktif membran. Sensor turbiditas berbasis IoT yang dikembangkan juga mampu memantau perubahan kekeruhan secara konsisten melalui model kalibrasi kuadratik. Temuan ini menunjukkan potensi pemanfaatan membran biokomposit selulosa/nanosilika dan sistem monitoring IoT untuk aplikasi pengolahan limbah cair industri tapioka.

DAFTAR PUSTAKA

- Andareswari, N., Hariyadi, S., & Yulianto, G. (2019). Karakteristik dan strategi pengelolaan limbah cair usaha tapioka di Bogor Utara. *Jurnal ECOLAB*, 13(2), 85–96. <https://doi.org/10.20886/jklh.2019.13.2.85-96>
- Delwizar, M. A., Arsenly, A., Irawan, H., Jodiansyah, M., & Utomo, R. M. (2021). Perancangan prototipe sistem monitoring kejernihan air dengan sensor turbidity pada tandon berbasis IoT. *Jurnal Teknologi Elektro*, 12(3), 106–112. <https://doi.org/10.22441/jte.2021.v12i3.002>

- Djana, M., Mayasari, R., Werena, R. D., & Anwar, H. (2024). Desain sistem pengolahan air layak konsumsi dengan aplikasi membran ultrafiltrasi termodifikasi. *Jurnal Redoks*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.31851/redoks.v9i1.13208>
- Fathurrohman, M. I., Puspitasari, S., Falaah, A. F., Anggraini, L., Sutisna, N. A., & Hakiki, R. (2023). Pemanfaatan biosilika dari sekam padi sebagai bahan pengisi untuk telapak ban ramah lingkungan. *Prosiding Seminar Nasional Hasil Penelitian Agribisnis*, 7(1), 56–61. <https://jurnal.unigal.ac.id/prosiding/article/view/11451>
- González-García, P. (2018). Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1393–1414. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.117>
- Handayani, P. A., Nurjanah, E., & Rengga, W. D. P. (2014). Pemanfaatan limbah sekam padi menjadi silika gel. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 3(2), 55–59. <https://doi.org/10.15294/jbat.v3i2.3698>
- Hartiwi, T. (2024, Januari 16). Kebermaknaan turbidity meter dalam pemantauan kualitas air. *Hanna Instruments Indonesia*. <https://hannainst.id/kebermaknaan-turbidity-meter-dalam-pemantauan-kualitas-air/>
- Ijaz, S., Kausar, A., Iqbal, M., El Messaoudi, N., Miyah, Y., Knani, S., & Graba, B. (2025). Advances in extraction of silica from rice husk and its modification for friendly

- environmental wastewater treatment via adsorption technology. *Journal of Water Process Engineering*, 71, Article 107187. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107187>
- Iskandar, H. R., Hermadani, H., Saputra, D. I., & Yuliana, H. (2019). Eksperimental uji kekeruhan air berbasis Internet of Things menggunakan sensor DFRobot SEN0189 dan MQTT cloud server. *Prosiding SEMNASTEK 2019*. Universitas Muhammadiyah Jakarta. <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek/article/view/5164>
- Joshi, R., Sebat, N., Chi, K., Khan, M., Johnson, K. I., Alhamzani, A. G., Habib, M. A., Lindstrom, T., & Hsiao, B. S. (2023). Low fouling nanostructured cellulose membranes for ultrafiltration in wastewater treatment. *Membranes*, 13(2), Article 147. <https://doi.org/10.3390/membranes13020147>
- Kaur, G., Nakamura, K., Ogawa, K., & Wakui, K. (2023). Monitoring of MBR fouling properties by filtration resistance and zeta potential measured for both filtration and backwashing directions. *Journal of Membrane Science*, 675, Article 121550. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121550>
- Miri, S., Raghuwanshi, V. S., Andrews, P. C., & Batchelor, W. (2021). Composites of mesoporous silica precipitated on nanofibrillated cellulose and microfibrillated cellulose: Effect of fibre diameter and reaction conditions on particle size and mesopore diameter. *Microporous and Mesoporous Materials*, 311, Article 110701. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110701>
- Nazri, A. I., Ahmad, A. L., & Hussin, M. H. (2021). Microcrystalline cellulose blended polyethersulfone membranes for enhanced water permeability and humic acid removal. *Membranes*, 11(9), Article 660. <https://doi.org/10.3390/membranes11090660>
- Novie. (2012, Maret 7). Total Suspended Solid (TSS). *Environmental Chemistry*. <http://environmentalchemistry.wordpress.com/>
- Pramono, E., Zakaria, M. A., Fridiasari, K. F., Ndruru, S. T. C. L., Bagaskara, M., Mustofa, R. E., Sejati, G. P. W., Purnawan, C., & Saputra, O. A. (2022). Cellulose derived from oil palm empty fruit bunches as filler on polyvinylidene fluoride based membrane for water containing humic acid treatment. *Groundwater for Sustainable Development*, 17, Article 100744. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100744>
- Sharma, A., Thakur, M., Bhattacharya, M., Mandal, T., & Goswami, S. (2019). Commercial application of cellulose nano-composites – A review. *Biotechnology Reports*, 21, Article e00316. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00316>
- Susanto, H., & Ulbricht, M. (2009). Characteristics, performance and stability of polyethersulfone ultrafiltration membranes prepared by phase separation method using different macromolecular additives. *Journal of Membrane Science*, 327(1–2), 125–135. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.11.025>
- Tilche, A., & Vieira, S. M. M. (1991). Discussion report on reactor design of anaerobic filters and sludge bed reactors. *Water Science and Technology*, 24(8), 193–206. <https://doi.org/10.2166/wst.1991.0225>
- Trevathan, J., Schmidtke, S., Read, W., Sharp, T., & Sattar, A. (2022). Implementation and calibration of an IoT light attenuation turbidity sensor. *Internet of Things*, 19, Article 100576. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100576>
- Waleed, H., Hudaib, B., Al-Harashsheh, M., & Allawzi, M. (2025). Synthesis and characterization of a modified silica/cellulose acetate nanocomposite ultrafiltration membrane for phenol removal from wastewater. *Separation and Purification Technology*, 353, Article 128391. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128391>
- Wibowo, S., Roziyanto, A. N., Farizi, I., Tirta, A. P., Rahman, A., & Subagio, A. (2022). Nanosilica from rice husk synthesized by a simple heating method and its characterization. *Nano Hybrids and Composites*, 35, 11–17. <https://doi.org/10.4028/p-9wx28g>
- Zakaria, A., Sauri, S., Fadela, D. M., & Wardhani, P. S. A. (2021). Efisiensi penurunan kadar COD, TS, TSS, kekeruhan, dan TDS pada air limbah industri pangan menggunakan koagulan poly aluminium chloride dengan metode jar test. *Warta AKAB*, 45(2), 98–104. <https://doi.org/10.55075/wa.v45i2.60>