

Isolasi dan Karakterisasi Pati dari Kulit Singkong (*Manihot esculenta*) sebagai Bioflokulan untuk Menurunkan Kadar Limbah Fenol dan *p*-Klorofenol

Regina Pairunan¹, Edi Suryanto^{1*}, Vanda S Kamu¹

¹Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sam Ratulangi

*email korespondensi: edisuryanto@unsrat.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini menguji efektivitas pati kulit singkong sebagai bioflokulan organik dalam pengolahan limbah kimia fenol dan *p*-klorofenol. Fokus utama studi adalah menganalisis pengaruh proses gelatinisasi, variasi dosis pati, serta durasi pengadukan terhadap efisiensi penurunan kadar polutan. Proses dimulai dengan isolasi pati lewat deproteinasi menggunakan larutan NaOH 0,5 M. Selanjutnya, flokulasi diuji pada 10 ml sampel limbah dengan memvariasikan dosis bioflokulan (0,2; 0,5; dan 1 gram) serta waktu pengadukan (15, 30, dan 60 menit). Hasil eksperimen membuktikan bahwa pati kulit singkong sangat efektif sebagai agen pengolah limbah. Kondisi operasional optimum tercapai pada dosis 0,5 gram dengan waktu pengadukan 30 menit, yang mampu mereduksi kadar fenol sebesar 85,32% dan *p*-klorofenol sebesar 84,32%.

Kata kunci : pati kulit singkong, bioflokulan, fenol, *p*-klorofenol

ABSTRACT

This study evaluates the effectiveness of cassava peel starch as an organic bioflocculant for treating phenol and *p*-chlorophenol chemical wastewater. The primary focus of the study is to analyze the effects of the gelatinization process, variations in starch dosage, and stirring duration on pollutant reduction efficiency. The process began with starch isolation via deproteinization using a 0.5 M NaOH solution. Subsequently, flocculation was tested on 10 mL wastewater samples by varying the bioflocculant dosages (0.2, 0.5, and 1 g) and stirring times (15, 30, and 60 min). Experimental results demonstrate that cassava peel starch is highly effective as a wastewater treatment agent. The optimum operational conditions were achieved at a dosage of 0.5 g with a stirring time of 30 min, which reduced phenol and *p*-chlorophenol levels by 85.32% and 84.32%, respectively.

Keywords: cassava peel starch, bioflocculant, phenol, *p*-chlorophenol.

PENDAHULUAN

Perkembangan industrialisasi, urbanisasi, dan populasi telah menciptakan tekanan terhadap kehidupan makhluk hidup yang menimbulkan dampak pada pencemaran lingkungan. Pencemaran lingkungan diakibatkan karena adanya limbah yang tidak ditangani secara baik seperti halnya limbah cair. Kuantitas yang melimpah dan komposisi polutan yang kompleks menjadi karakteristik utama dari limbah cair dibandingkan dengan bentuk limbah lainnya. Berbagai jenis polutan seperti fenol, logam berat, alkohol, pewarna sintetis, serta minyak umum ditemukan dalam limbah jenis ini (Martini dkk., 2020).

Limbah cair yang mengandung senyawa fenol (seperti fenol dan *p*-klorofenol) merupakan limbah yang dilaporkan sebagai limbah berbahaya dan tersebar luas sebagai limbah yang menyebabkan kuantitasnya meningkat dan menjadikannya sebagai salah satu sumber utama penyebab polusi air (Shodiq, 2020). Sebagai polutan yang toksik dan korosif, limbah fenol dikategorikan sebagai bahan berbahaya yang mengancam ekosistem akuatik. Keberadaan fenol di badan air memicu penurunan kadar oksigen terlarut (*dissolved oxygen*), yang secara langsung mengganggu kelangsungan hidup flora dan fauna air. Selain menurunkan kualitas estetika air melalui timbulnya bau dan rasa yang tidak sedap, senyawa ini juga bersifat letal bagi bakteri aerob serta mampu memicu kematian massal organisme perairan pada tingkat konsentrasi tertentu (Sari dkk., 2016).

Umumnya beberapa industri menghasilkan limbah yang mengandung fenol diantaranya, industri kimia, penyulingan minyak, petrokimia, farmasi, tekstil, baja operasi batubara, plastik, cat, kertas, dan produk kayu (Pratiwi dkk., 2021). Sebagai senyawa toksik fenol berbahaya karena terdegradasi sangat lambat oleh cahaya matahari, sehingga fenol dalam air limbah bersifat karsinogenik dan memiliki tingkat toksisitas yang tinggi yang menyebabkan kerusakan yang serius bagi kesehatan (Fitri, 2017).

Bagi kesehatan manusia, fenol bertindak sebagai anestetik lokal yang mampu mengganggu sistem saraf pusat serta memicu kerusakan organ vital. Paparan senyawa ini dapat mengakibatkan kebutaan, gangguan pencernaan, kerusakan hati dan ginjal, iritasi kulit, hingga fatalitas (Rahma & Ritonga, 2025). Mengingat tingkat toksisitasnya yang sangat tinggi dan berisiko menyebabkan kematian, pemerintah memperketat ambang batas keberadaannya. Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia (PERMEN LHK RI) No. 6 Tahun 2021 tentang Baku Mutu Air Limbah, kadar fenol dari aktivitas industri dan usaha dibatasi maksimal sebesar 0,5 mg/L.

Eksistensi fenol dalam air limbah dapat diminimalkan dengan berbagai cara seperti adsorpsi, oksidasi kimia, proses biologis, dan sebagainya (Naguib dkk., 2020). Namun kemampuannya diketahui berdampak pada lingkungan dan kesehatan, seperti adsorben yang memiliki kapasitas adsorben terbatas (Abu-Nada dkk., 2021), oksidasi kimia yang berpotensi membentuk produk yang masih toksik (Gao dkk., 2025), proses biologis yang dipengaruhi oleh konsentrasi fenol, bersifat toksik dan dapat menghambat aktivitas mikroorganisme pada kadar tertentu (Sabri dkk., 2025). Oleh karena itu diperlukan suatu pengolahan untuk menurunkan kadar fenol yang ada dalam air limbah salah satunya dengan cara flokulan (Kumar dkk., 2021).

Meskipun koagulan komersial seperti aluminium sulfat (tawas), polialuminium klorida (PAC), dan polimer kation sering diandalkan dalam proses flokulasi (Nurika dkk., 2007), penggunaannya memicu kekhawatiran ekologis. Flokulan sintesis tersebut dinilai kurang ramah lingkungan akibat meninggalkan residu senyawa aluminium sulfat yang tinggi. Akumulasi sisa aluminium yang melebihi ambang batas 0,2 mg/L ini berpotensi mencemari badan air dan berdampak buruk bagi lingkungan. (Alfian dkk, 2017). Adam dan Agab (2006) menyatakan bahwa paparan ikan nila (*Oreochromis niloticus*) terhadap PAC mengakibatkan penurunan signifikan pada konsentrasi hemoglobin, jumlah eritrosit, dan volume sel darah merah. Sehingga perlu diatasi dengan menggunakan flokulan dari bahan alami. Flokulan alami (bioflokulan) merupakan polimer yang larut dalam air, berkarakter anionik, kationik atau nonionik. Salah satu flokulan alami yang paling umum adalah pati yang efektif dalam peningkatan kualitas limbah cair (Saputroh dkk, 2020).

Tanaman singkong (*Manihot esculenta*) merupakan salah satu tanaman pangan alternatif yang keberadaannya melimpah di Indonesia yang dimanfaatkan sebagai pengganti nasi dan beragam olahan makanan. Bagian yang jarang digunakan adalah kulitnya, sehingga kulit singkong terbuang begitu saja dan menjadi limbah. Kulit singkong merupakan limbah pertanian yang mengandung pati, selulosa, dan tanin, yang berperan dalam pembentukan flok dan pengikatan senyawa pencemar (Handayani & Santoso, 2019). Berdasarkan penelitian Richana (2013) kulit singkong memiliki kadar karbohidrat (pati) sebesar 44-59%, yang dapat mengindikasikan unsur karbon yang tinggi dan berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai Bioflokulan (Kumar dkk., 2021). Pati sebagai polimer memiliki kemampuan mengikat partikel tersuspensi (kontaminan) dalam air limbah sehingga pati merupakan pilihan ramah lingkungan, mudah terdegradasi (biodegradable), melimpah, dan terjangkau (Saputroh dkk., 2020).

Pati asli memiliki keterbatasan meliputi luas permukaan rendah, stabilitas termal terbatas, degradabilitas cepat, dan kurangnya gugus fungsi reaktif. Untuk mengatasi keterbatasan dan meningkatkan kemampuan, maka perlu berbagai modifikasi pati (Khoo dkk., 2023). Pati yang dimodifikasi dapat memenuhi berbagai aplikasi dengan menambahkan berbagai gugus fungsional ke strukturnya karena pati mengandung sejumlah besar gugus hidroksil dalam cincin sakarida (Kocaman dan Yildiz, 2023). Salah satu modifikasi pati yaitu dengan proses gelatinisasi yang merupakan modifikasi fisik (Fitriani dkk., 2023).

Pemanfaatan pati tergelatinisasi sebagai flokulan didasarkan pada kemampuannya untuk mengikat partikel tersuspensi melalui rantai polimer yang panjang. Menurut The dkk. (2014), tahap awal flokulasi terjadi saat polimer tersebut menempel pada sebagian area permukaan partikel target. Begitu dicampurkan ke dalam limbah cair, molekul pati akan tersebar secara merata dan berinteraksi

langsung dengan senyawa-senyawa organik, sehingga memicu pembentukan flok-flok yang siap mengendap (Coniwanti dkk, 2013).

BAHAN DAN METODE

Sampel yang digunakan dalam riset ini adalah, kulit singkong yang diambil dari rumah atau usaha penduduk di Manado, Sulawesi Utara. Bahan-bahan asam sitrat ($C_6H_8O_7$), natrium hidroksida (NaOH) 0.05 M, limbah fenol (limbah cair pembersih lantai) dan p-klorofenol (limbah cair desinfektan), natrium karbonat (Na_2CO_3), reagen Folin Ciocalteu 50%, kertas saring *Whatman* (teknis) dan akuades.

Preparasi sampel

Kulit singkong dicuci hingga bersih, lalu dipotong kecil-kecil dan direndam dalam asam sitrat 10% selama 15 menit. Setelah itu, diblender menggunakan 1000 mL asam sitrat kemudian disaring menggunakan kain sifon dan saringan untuk memisahkan ampas dengan larutan pati dan didiamkan selama 24 jam. Setelah itu, endapan pati yang dihasilkan dikeringkan dalam oven pada suhu $70^\circ C$.

Isolasi pati kulit singkong

Isolasi pati kulit singkong mengikuti metode Mojiono dkk. (2020) yang telah dimodifikasi. Pati yang diperoleh dari ekstraksi kulit singkong ditambahkan NaOH 0,05 M dan diaduk selama 30 menit, untuk memisahkan pati dengan protein. Kemudian disaring lalu diulangi tiga kali pencucian hingga didapatkan pH netral. Endapan yang dihasilkan dikeringkan didalam oven suhu $70^\circ C$ dalam waktu 30 menit. Selanjutnya, endapan diayak menggunakan ayakan 100 mesh.

Proses gelatinisasi antara pati dengan fenol dan p-klorofenol

Pati kulit singkong masing-masing sebanyak 5 gram ditambahkan 5 ppm, 10 ppm dan 50 ppm fenol dan p-klorofenol lalu dipanaskan pada suhu $90^\circ C$, $80^\circ C$ dan $70^\circ C$ selama 30 menit untuk membentuk gel pati, Hasil yang diperoleh didinginkan lalu dituang ke petri dish, kemudian dikeringkan selama 3 hari disuhu ruang sampai gel pati terbentuk. Gel pati yang terbentuk dihaluskan dan ditimbang. Hasil yang diperoleh dikarakterisasi menggunakan FT-IR, SEM-EDS dan XRD.

Uji Kadar Fenol dan p-klorofenol

Sebanyak 0,2 gram gel pati ditambahkan kedalam 10 ml aquades, setelah itu disonifikasi selama 30 menit. Hasil sonifikasi dituang kedalam tabung reaksi lalu disentrifugasi dengan kecepatan 3,000 rpm selama 10 menit, selanjutnya dilakukan penentuan kandungan total fenol. Dengan hal yang sama dilakukan pada p-klorofenol

Analisis Kualitatif dan Kuantitatif Fenol dalam Limbah

Sebelum tahapan pengujian dimulai, sampel limbah fenol terlebih dahulu dipisahkan antara fasa padat dan fasa cairnya menggunakan metode sentrifugasi. Uji kualitatif dilakukan dengan memasukkan 0,1 mL filtrat limbah ke dalam tabung reaksi, lalu ditambahkan 0,1 mL reagen $FeCl_3$ 50%. Campuran tersebut dihomogenkan menggunakan *vortex mixer*, kemudian direaksikan dengan 2 mL larutan Na_2CO_3 2%. Keberadaan senyawa fenol diidentifikasi melalui terbentuknya endapan berwarna biru. Sementara itu, analisis kuantitatif dijalankan dengan prosedur preparasi sampel yang serupa dengan uji kualitatif. Setelah penambahan seluruh reagen, campuran diinkubasi selama 30 menit hingga intensitas warna biru terbentuk secara optimal. Nilai absorbansi larutan selanjutnya diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang (λ) 730 nm.

Studi flokukasi limbah fenol dan p-Klorofenol

Pengaruh massa dan waktu kontak pati gelatinisasi kulit singkong

Sebanyak 10 mL cairan hasil sentrifus ditambahkan dengan 0,2 g, 0,5, dan 1 g bioflokulan pati gelatinisasi kulit singkong, Campuran kemudian *distirer* dengan kecepatan pengadukan 30 rpm, dengan variasi waktu 15, 30, dan 60 menit dan selanjutnya disentrifus dengan kecepatan 300 rpm selama 10

menit. Selanjutnya dilakukan penentuan kadar fenol yang terdapat dalam limbah. Dengan hal yang sama dilakukan pada limbah p-klorofenol..

Penentuan kandungan total fenol

Penentuan kandungan total fenol dilakukan dengan menerapkan metode Folin-Ciocalteu. Prosedur diawali dengan memasukkan 0,1 mL sampel berupa ekstrak kulit singkong (konsentrasi 1000 µg/mL) ke dalam tabung reaksi, kemudian direaksikan dengan 0,1 mL reagen Folin-Ciocalteu 50%. Campuran tersebut dihomogenkan menggunakan *vortex mixer*, lalu ditambahkan 2 mL larutan natrium karbonat 2%. Campuran reaksi selanjutnya diinkubasi di dalam ruang gelap selama 30 menit. Pengujian ini dilakukan dengan tiga kali replikasi. Nilai absorbansi larutan kompleks yang terbentuk diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang λ 750 nm.

Penentuan kapasitas flokulasi

Penentuan kapasitas flokulasi optimum dihitung menggunakan Persamaan 1 dan efisiensi flokulasi dihitung dengan Persamaan 2 :

$$EF = \frac{(C_o - C_a)}{M} \times V \quad (1)$$

$$F = \frac{(C_o - C_a)}{C_o} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan: F = Kapasitas flokulasi (mg/g), C_o = konsentrasi awal (mg/L), C_a = konsentrasi akhir (mg/L), M = massa adsorben (g), V = volume (L)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Isolasi pati kulit singkong

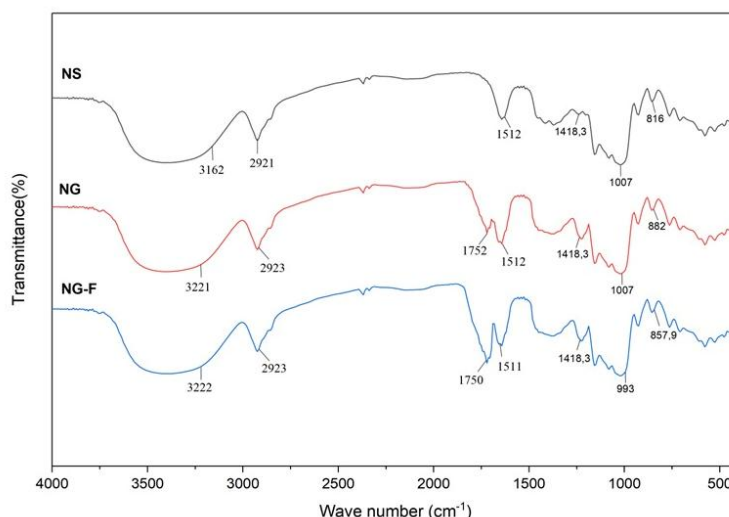
Pada isolasi pati dari kulit singkong, pati yang dihasilkan ditambahkan NaOH 0,05 M untuk memisahkan protein dari pati. Setelah disaring residu pati yang dihasilkan sedikit berubah warna putih kecoklatan. Hal ini karena pada proses pencucian pertama (netralisasi) kurang sempurna, sisa-sisa protein yang teroksidasi dalam larutan basa akan menyebabkan warna coklat pada produk pati, oleh karena itu dilakukan pengulangan pencucian sebanyak tiga kali pencucian hingga mencapai pH netral dan hingga pati yang dihasilkan berwarna putih.

Isolasi pati dinilai lebih efektif daripada metode ekstraksi biasa dalam memisahkan fraksi amilosa dan amilopektin murni. Hal ini didukung oleh fakta bahwa proses isolasi memfasilitasi perusakan dinding sel pengotor serta penetrasi agen isolasi ke dalam struktur granula pati yang membesar (Sumarno, 2013). Untuk memperoleh pati kulit singkong yang bersih dari kontaminan makromolekul, metode deproteinasi diterapkan menggunakan larutan basa encer seperti NaOH atau KOH guna melarutkan protein yang terikat pada pati (Saputroh dkk., 2020).

Pada penelitian ini, hasil dari proses isolasi pati dari kulit singkong yang diperoleh adalah rendemen pati sebesar 24%. Jika dibandingkan dengan penelitian (Saputroh dkk., 2020) didapatkan kadar pati biji asam jawa sebesar 19,02% dalam 50 gram sampel. Pati yang telah diisolasi kemudian digunakan sebagai bioflokulan karena pati merupakan polimer rantai panjang yang mampu memacu terjadinya proses flokulasi.

Hasil analisis gugus fungsi dengan FTIR

Berdasarkan hasil gugus fungsi pati kulit singkong yang diisolasi (NS), pati kulit singkong yang tergelatinisasi (NG) dan pati kulit singkong yang tergelatinisasi dengan fenol (NG-F). gugus fungsi yang utama ialah -OH, -CH, C=C, dan C-O-C. Analisis spektrum FTIR dilakukan dengan menginterpretasikan puncak-puncak serapan inframerah yang terbentuk. Karakteristik gugus fungsi dari pati kulit singkong yang berhasil diisolasi ditampilkan pada Gambar 1. Spektrum tersebut menunjukkan adanya pita serapan melebar pada bilangan gelombang 3100–3600 cm^{-1} , yang mengonfirmasi vibrasi regangan (*stretching*) dari gugus fungsi O-H. Keberadaan gugus hidroksil ini merupakan karakteristik struktural utama yang berasal dari molekul pati (Garces dkk., 2021).

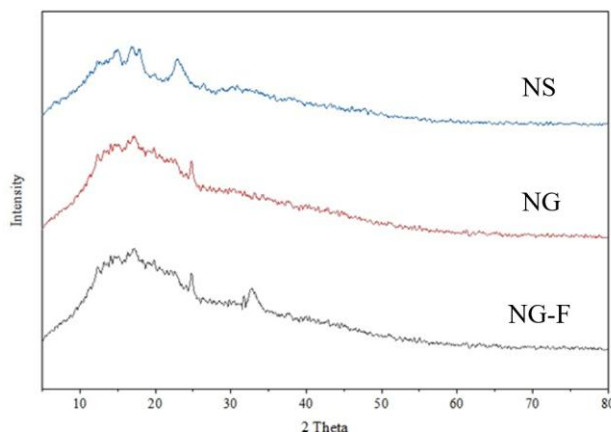


Gambar 1. Spektra FTIR pati kulit singkong

Spektrum dari NG dan NG-F menunjukkan dua pita serapan pada daerah bilangan gelombang 2923 cm^{-1} dan NS pada daerah bilangan gelombang 2921 cm^{-1} , yang mana daerah serapan $3000\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan vibrasi C-H dari pati (Prameswari dkk., 2022). Serapan pati gelatinisasi (NG) pada bilangan gelombang 1752 cm^{-1} dan serapan pati gelatinisasi fenol (NG-F) pada bilangan gelombang 1750 cm^{-1} . Pada daerah rentangan bilangan gelombang $1680\text{--}1780\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya ikatan C=O (Petit dan Puskar, 2018). Serapan pada NS bilangan gelombang 1512 cm^{-1} , NG bilangan gelombang 1512 cm^{-1} , dan NG-F bilangan gelombang 1511 cm^{-1} , menunjukkan adanya ikatan C=C aromatik yang mana serapan $1600\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan adanya vibrasi kerangka aromatik pati (Satmalawat dkk., 2024). Adapun pada serapan bilangan gelombang $1418,3\text{ cm}^{-1}$ terdapat gugus bending C-H (Satmalawat dkk., 2024). Pada NS bilangan gelombang 1007 cm^{-1} , NG bilangan gelombang 1007 cm^{-1} , dan NG-F bilangan gelombang 993 cm^{-1} menunjukkan adanya ikatan gugus bending C-O-C. Pada daerah rentangan bilangan gelombang $1200\text{--}900\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya ikatan C-O-C (Garces dkk., 2021). Serta pada NS bilangan gelombang 816 cm^{-1} , NG bilangan gelombang 822 cm^{-1} , dan NG-F bilangan gelombang 814 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus bending C-H. Sejalan dengan identifikasi gugus fungsional pati ubi kayu pada bilangan gelombang $857,9\text{ cm}^{-1}$ teridentifikasi bahwa adanya gugus bending C-H (Satmalawati dkk., 2021).

Analisis kristalinitas dengan XRD

Pola difraksi sinar-x pati native menunjukkan pati kulit singkong mengandung fasa kristal dan amorf. Hal ini dapat dilihat dari munculnya tiga puncak terkuat yang spesifik pada 2θ yaitu $15,68^\circ$, $24,8^\circ$ dan $32,84^\circ$ (Gambar 2).

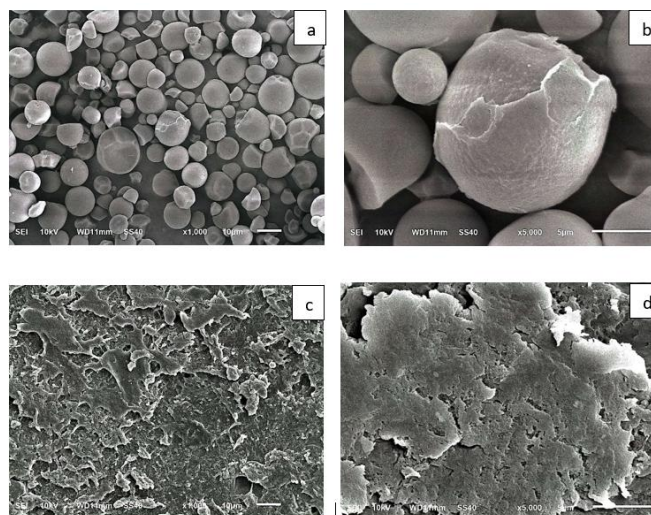


Gambar 2. Difraktogram a) pati kulit singkong (NS) b) pati gelatinisasi (NG) c) gelatinisasi dengan fenol (NG-F)

Hasil pemeriksaan XRD menunjukkan pati kulit singkong memiliki kristalinitas sebesar 36,45% dengan ukuran kristal 3,72 nm. Adapun hasil pada pati gelatinisasi kulit singkong memiliki puncak 14,94, 16,96 dan 23 dengan kristalinitas sebesar 54,20% dan ukuran kristal sebesar 3,59 nm. Hasil yang diperoleh juga hampir mirip dengan pati gelatinisasi dengan fenol memiliki puncak 14,06, 17,04 dan 24,8 dengan kristalinitas 55,64% dan ukuran kristal sebesar 3,97 nm.

Analisis morfologi pati kulit singkong dengan SEM

Morfologi permukaan kimia pati kulit singkong dianalisis menggunakan SEM yang dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. SEM a) pati kulit singkong b) perbesaran 5.000 pati kulit singkong c) pati tergelatinisasi-fenol d) perbesaran 5.000 pati tergelatinisasi-fenol

SEM granula pati ubi kayu terlihat pada Gambar 3 a & b. Jika dibandingkan pada hasil SEM gambar 3 c & d menunjukkan bagian pati gelatinisasi dengan fenol menjadi tidak teratur, hal ini mengindikasikan bahwa pada proses gelatinisasi pati berhasil mengikat fenol sehingga awalnya struktur pada pati native yang teratur menjadi tidak teratur setelah digelatinisasi dengan fenol. Hal ini membuat morfologi granula menjadi tidak beraturan akibat interaksi molekuler antara pati dan fenol. Menurut Guo dkk (2024) proses gelatinisasi membuat struktur heliks dan kristal pati hancur, menyebabkan granula mengembang, terdistorsi, dan berpori, yang kemudian membentuk struktur gel yang terorganisasi ulang dengan pori-pori lebih besar.

Uji Kadar Fenol dan p-Klorofenol

Berdasarkan hasil uji penurunan kadar fenol menggunakan pati yang mengalami proses gelatinisasi, diperoleh bahwa nilai persentase efisiensi flokulasi cenderung meningkat pada setiap kenaikan konsentrasi fenol pada rentang suhu gelatinisasi 70–90 °C. Pada suhu 90 °C, persentase efisiensi flokulasi yang diperoleh pada konsentrasi 5, 10, dan 50 ppm masing-masing sebesar 54,79%, 69,40%, dan 93,90%. Sementara, pada suhu 80 °C diperoleh nilai efisiensi sebesar 72,15%, 79,82%, dan 95,61% pada konsentrasi yang sama. Adapun pada suhu 70 °C, nilai efisiensi flokulasi yang dihasilkan pada konsentrasi 5, 10, dan 50 ppm berturut-turut yaitu 72,15%, 91,28%, dan 95,93%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada suhu yang sama, peningkatan konsentrasi fenol diikuti oleh meningkatnya persentase efisiensi flokulasi. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi konsentrasi fenol dalam larutan, semakin besar kemungkinan terjadinya interaksi antara molekul fenol dengan gugus hidroksil (–OH) yang terdapat pada pati yang telah mengalami gelatinisasi.

Berdasarkan hasil menunjukkan bahwa persentase flokulasi mengalami penurunan seiring dengan penurunan suhu, dari 90°C ke 70°C, pada setiap variasi konsentrasi yang diuji. Pada suhu 90°C, nilai persentase flokulasi untuk konsentrasi 5, 10, dan 50 ppm masing-masing adalah sebesar 89,51%;

93,36%; dan 96,93%. Ketika suhu diturunkan menjadi 80°C, nilai persentase flokulasi untuk konsentrasi yang sama berturut-turut menurun menjadi 70,06%; 79,47%; dan 95,34%. Penurunan lebih lanjut terjadi pada suhu 70°C, di mana diperoleh nilai flokulasi sebesar 67,98% untuk konsentrasi 5 ppm, 71,14% untuk konsentrasi 10 ppm, dan 93,39% untuk konsentrasi 50 ppm.

Dari hasil persentase mengindikasikan bahwa suhu memiliki peran dalam proses flokulasi, di mana suhu 90°C memberikan nilai persentase flokulasi tertinggi pada seluruh rentang konsentrasi, sehingga dapat ditetapkan sebagai kondisi terbaik. Hal ini dapat terjadi karena peningkatan suhu hingga 90°C mendekati atau melampaui suhu gelatinisasi pati, yang menyebabkan granula pati mengembang maksimal (*swelling*) dan mengalami disrupsi struktur. Dengan demikian, suhu 90°C terbukti menjadi kondisi optimal karena mampu memaksimalkan *swelling* pati, meningkatkan mobilitas molekuler, dan mendorong terbentuknya kompleks pati-fenol yang stabil, yang pada akhirnya menghasilkan efisiensi flokulasi tertinggi hingga mencapai 96,93% pada konsentrasi 50 ppm.

Analisis kualitatif dan kuantitatif fenol dalam limbah

Penentuan ada atau tidaknya fenol dalam limbah cair desinfektan dan pembersih lantai menggunakan pereaksi tetes yaitu FeCl_3 dan Na_2CO_3 . Gambar 4 menunjukkan bahwa limbah cair dalam desinfektan dan pembersih lantai mengandung p-klorofenol dan fenol yang ditunjukkan dengan perubahan warna dari warna orange pekat menjadi warna biru ketika direaksikan dengan FeCl_3 dan Na_2CO_3 .

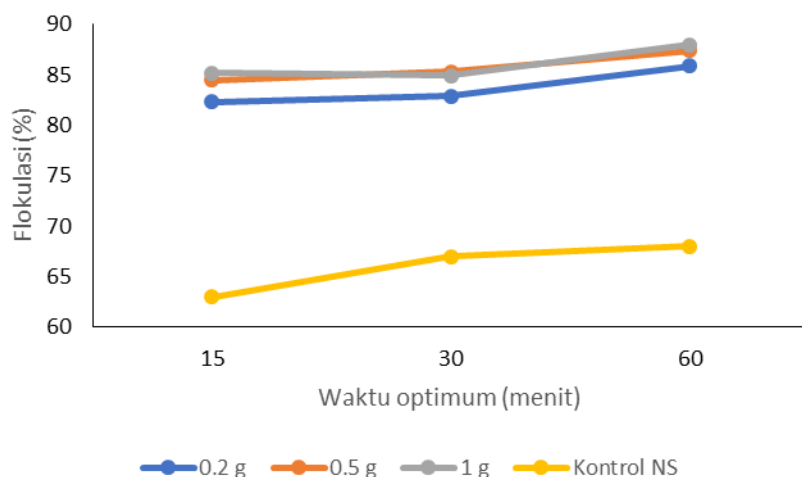


Gambar 4. Hasil pengujian kualitatif limbah cair dalam desinfektan dan pembersih lantai dengan pereaksi FeCl_3 dan Na_2CO_3

Penentuan kadar fenol dalam limbah cair dalam desinfektan dan pembersih lantai secara kuantitatif menggunakan metode spektrofotometri. Pada pengujian ini digunakan reagen yaitu FeCl_3 dan Na_2CO_3 . Reagen FeCl_3 berfungsi sebagai pereaksi dalam pengujian limbah fenol karena ion Fe^{3+} membentuk kompleks berwarna (biru kehitaman) dengan gugus fenolat melalui mekanisme koordinasi ligan-logam (transfer muatan ligan ke logam), sehingga perubahan warna tersebut digunakan sebagai indikator adanya senyawa fenol dalam sampel limbah (Zhang dkk., 2022). Fungsi penambahan natrium karbonat adalah untuk mengondisikan sampel dalam suasana basa agar reaksi kompleksasi fenol berlangsung maksimal sebelum diukur dengan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 750 nm. Hasil analisis kuantitatif menunjukkan adanya kandungan polutan yang signifikan pada kedua sampel komersial. Limbah cair desinfektan terbukti mengandung p-klorofenol sebesar 65,59 ppm, sedangkan limbah cair pembersih lantai memiliki kadar fenol sebesar 73,61 ppm.

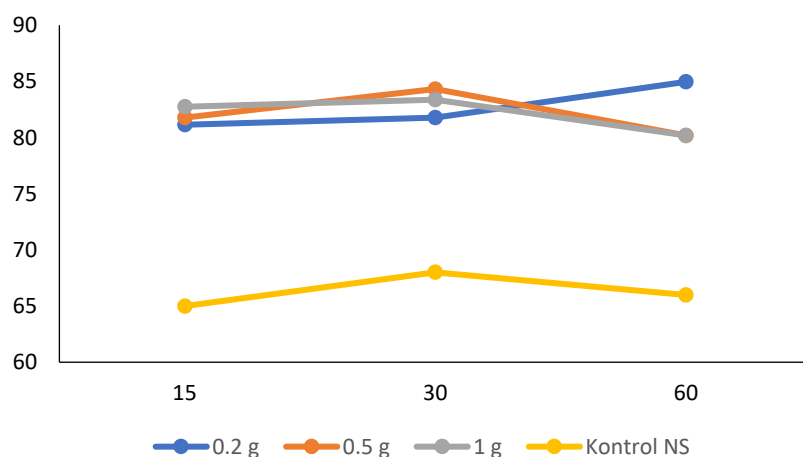
Studi Flokulasi

Uji penentuan kondisi optimum flokulasi pada fenol dan p-klorofenol pati gelatinisasi kulit singkong dilakukan untuk limbah cair. Persentase penurunan kadar fenol dalam limbah cair dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Persentase flokulasi fenol oleh pati kulit singkong (0,2 g; 0,5 g dan 1 g).

Sampel limbah cair pembersih lantai awal memiliki kandungan fenol sebesar 73,61 ppm, di mana proses flokulasinya menunjukkan tren penurunan kadar polutan yang fluktuatif terhadap variasi waktu pengadukan (15, 30, dan 60 menit). Perbedaan yang signifikan teramati pada durasi pengadukan 15 menit, yang menunjukkan kecenderungan peningkatan efisiensi penyisihan polutan. Namun, pada dosis bioflokulan terendah (0,2 g), efisiensi yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan durasi pengadukan 30 dan 60 menit pada kondisi massa dan konsentrasi awal yang sama. Fenomena ini disebabkan oleh durasi pengadukan yang singkat serta keterbatasan dosis bioflokulan, sehingga polimer rantai panjang dari pati organik tidak mampu terdistribusi secara homogen ke dalam sistem limbah. Kondisi operasional optimum dicapai pada waktu pengadukan 30 menit dengan dosis pati kulit singkong tergelatinisasi sebesar 0,5 g. Parameter tersebut menunjukkan tren stabilitas yang baik, ditandai dengan margin fluktuasi nilai persentase penurunan yang tidak terlalu signifikan.



Gambar 6. Persentase flokulasi *p*-klorofenol oleh pati kulit singkong (0,2 g; 0,5 g dan 1 g).

Limbah cair desinfektan mengandung *p*-klorofenol sebesar 65.59 ppm dengan persentase penurunan *p*-klorofenol terjadi tren yang fluktuatif pada waktu pengadukan selama 15, 30, dan 60 menit (Gambar 6). Hasil penelitian mengonfirmasi bahwa kondisi operasional optimum untuk kedua jenis limbah berada pada durasi pengadukan 30 menit dengan dosis bioflokulan sebesar 0,5 g. Penyimpangan tren yang signifikan teramati pada penambahan dosis hingga 1 g, di mana efisiensi penurunan kadar fenol cenderung mengalami penurunan akibat fenomena *over-dosing*. Kondisi ini dipicu oleh tingginya dosis pati kulit singkong yang tidak diimbangi dengan durasi pengadukan yang memadai, sehingga polimer organik cenderung menggumpal secara mandiri (*self-aggregation*) alih-alih mengikat padatan tersuspensi. Dosis bioflokulan yang lebih tinggi memerlukan waktu kontak yang lebih lama agar

molekul pati dapat terdistribusi secara homogen dan berinteraksi membentuk makroflok. Sebaliknya, penggunaan dosis rendah yang disertai waktu pengadukan terlalu lama dapat memicu gaya geser (*shear stress*) yang memecah flok yang telah terbentuk. Mengingat laju pembentukan flok akan melambat dan mencapai ukuran maksimum seiring pertumbuhannya, keseimbangan antara dosis dan durasi pengadukan menjadi faktor penentu perbedaan tren flokulasi secara mendasar.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil riset, kulit singkong (*Manihot esculenta*) yang digelatinisasi bermanfaat sebagai bioflokulan untuk menurunkan kadar fenol dan p-klorofenol dalam limbah cair. Pati kulit singkong diisolasi dan dikarakterisasi menggunakan FT-IR menunjukkan bahwa gugus fungsi utama yang teridentifikasi dalam pati kulit singkong meliputi O-H, C-H, C=C, dan C-O-C. Analisis XRD mengungkapkan bahwa pati *native* memiliki derajat kristalinitas sebesar 36,45%, yang meningkat menjadi 54,20% setelah proses gelatinisasi, dan mencapai 55,64% pada pati tergelatinisasi yang ditambahi fenol. Peningkatan ini mengindikasikan terbentuknya struktur kristalin baru akibat interaksi antara pati dan senyawa fenolik. Morfologi permukaan yang diamati melalui SEM menunjukkan bahwa pati tergelatinisasi dengan fenol memiliki struktur yang tidak teratur, yang mengindikasikan dominasi fase amorf sebagai hasil dari proses gelatinisasi dan interaksi molekuler. Uji kemampuan bioflokulan dilakukan terhadap limbah cair yang mengandung fenol dan p-klorofenol sebanyak 10 mL. Hasil penelitian menunjukkan bahwa persentase penurunan kadar fenol tertinggi dicapai pada penggunaan massa pati tergelatinisasi sebesar 0,5 g dengan waktu kontak 30 menit, yaitu sebesar 85,32%. Dengan demikian, pati kulit singkong tergelatinisasi berpotensi sebagai bioflokulan alami yang efektif dalam pengolahan limbah yang mengandung senyawa fenol.

DAFTAR PUSTAKA

- Abu-Nada, A., Abdala, A., dan McKay, G. 2021. Removal of phenols and dyes from aqueous solutions using graphene and graphene composite adsorption: a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9(5): 105858.
- Alfian, R., Hamzani, S., dan Khair, A. 2017. Pengaruh Tawas dan Waktu Pengadukan Terhadap Kadar Fosfat Pada Limbah Cair Laundry Di Martapura Kabupaten Banjar. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*. 14:(1).
- Coniwanti, P., Mertha, I. D., dan Eprianie, D. 2013. Pengaruh beberapa jenis koagulan terhadap pengolahan limbah cair industri tahu dalam tinjauannya terhadap turbidity, TSS dan COD. *Jurnal Teknik Kimia*. 19(3).
- Fitri, W. C. 2017. Pengaruh pH dan lama Penyinaran terhadap Aktivitas Degradasi Fenol menggunakan Fotokatalis Lapis Tipis TiO₂-Kitosan dengan Sinar UV. Skripsi. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya, Malang.
- Fitriani, D., Sari, R. P., dan Nugroho, A. 2023. Karakteristik gelatinisasi pati dan pengaruh suhu terhadap sifat fungsionalnya. *Jurnal Pangan dan Agroindustri*. 11(2): 67–75.
- Gao, Z., Wang, L., Wang, X. S., Zhao, X. N., Cui, C. W., Ma, J., dan Liu, Y. L. 2025. Secondary risks of polymeric products produced by persulfate-based oxidation technologies: Enhanced iodination kinetics and more toxic disinfection by-products. *Journal of Water Process Engineering*. 78: 108693.
- Garces, R., Villanueva, M., dan Lopez, O. 2021. FTIR characterization of starch and modified starch: Functional group analysis and structural changes. *Carbohydrate Polymers*. 251: 117095.
- Garces, R., Villanueva, M., dan Lopez, O. 2021. FTIR characterization of starch and modified starch: Functional group analysis and structural changes. *Carbohydrate Polymers*. 251: 117095.
- Guo, K., Tian, Y., Podzimska-Sroka, D., Kirkensgaard, J. J. K., Herburger, K., Enemark-Rasmussen, K., ... dan Zhong, Y. 2024. Structural evolution of maize starches with different amylose content during pasting and gelation as evidenced by rapid Visco Analyser. *Food Chemistry*. 461: 140817.

- Khoo, P. S., Ilyas, R. A., Uda, M. N. A., Hassan, S. A., Nordin, A. H., Norfarhana, A. S., ... dan Rafiqah, S. A. 2023. Starch-based polymer materials as advanced adsorbents for sustainable water treatment: current status, challenges, and future perspectives. *Polymers*. 15(14): 3114.
- Kocaman, E., dan Yildiz, M. 2023. Investigation of starch as flocculant for removing oil from oily wastewater. *Journal of Water Process Engineering*. 56: 104499.
- Kumar, V., Al-Gheethi, A., Asharuddin, S. M., dan Othman, N. 2021. Potential of cassava peels as a sustainable coagulant aid for institutional wastewater treatment: Characterisation, optimisation and techno-economic analysis. *Chemical Engineering Journal*. 420(2): 127642.
- Martini, S., Yuliwati, E., dan Kharismadewi, D. 2020. Pembuatan teknologi pengolahan limbah cair industri. *Jurnal Distilasi*. 5(2): 26-33.
- Mojiono dan Sholehah, D. N. 2020. Optimasi Ekstraksi Pati Jagung Madura-3 Berdasarkan Lama Perendaman dan Konsentrasi NaOH. *Journal of Science and Technology*. 13 (2):118-124.
- Naguib, D. M., dan Badawy, N. M. 2020. Phenol removal from wastewater using waste products. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), 103592.
- Nurika, A. R. Mulyanto, dan K. Afshari. 2007. Pemanfaatan Biji Asam Jawa (*Tamarindus Indica*) Sebagai Koagulan pada Proses Koagulasi Limbah Cair Tahu (Kajian Konsentrasi Serbuk Biji Asam Jawa dan Lama Pengadukan. Skripsi. Malang: Universitas Brawijaya.
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup. 2021. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 6 Tahun 2021 Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Industri dan/atau Kegiatan Usaha Lainnya. Menteri Lingkungan Hidup. Jakarta.
- Prameswari, R., Widjanarko, S. B., dan Nugroho, A. 2022. Karakterisasi pati termodifikasi menggunakan FTIR dan analisis sifat fungsional. *Jurnal Pangan dan Agroindustri*. 10(2): 89–98.
- Pratiwi, S. W., dan Utami, M. 2021. Analisis Kadar Fenol dan Chemical Oxygen Demand (COD) pada Limbah Hasil Elektroplating Tinplate di PT Latinusa, Tbk Cilegon. *Indonesian Journal Of Chemical Research*. 6(2): 71-79.
- Rahma, A. S., dan Ritonga, B. A. 2025. Aplikasi pada fenol dan dampaknya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. *Jurnal Pendidikan Tambusai*. 9(1): 2962–2965.
- Sabri, I., dan lainnya. 2025. Metabolic conversion of phenol to polyhydroxyalkanoate (PHA) for addressing dual environmental challenges: A review. *Current Research in Microbial Sciences*. 8: 100352.
- Saputroh, A. S., Priscilla, M. V., dan Susilowati, T. 2020. Kajian Efektifitas Bioflokulan Pati Biji Asam Jawa terhadap Penurunan Kadar COD Limbah Cair Tahu. *Chempro*. 1(1): 22-28.
- Sari, M., Dian, S., Suyasa, W. B., dan Mahardika, I. G. 2016. Pemanfaatan Biosistem Tanaman untuk menurunkan Kadar Fenol, Amonia, Ion Klorida, dan COD dari Proses Biodegradasi Air Limbah yang Mengandung Rhodamin B. *Ecotrophic*. 10(1): 1-8.
- Satmalawati, E. M., Paramita, B. L., dan Nino, J. 2021. Analisis gugus fungsi pati ubi kayu menggunakan spektroskopi FTIR. *Agritekno: Jurnal Teknologi Pertanian*. 10(2): 78–85.
- Satmalawati, E. M., Paramita, B. L., dan Nino, J. 2024. Karakterisasi gugus fungsi pati alami dan modifikasinya menggunakan FTIR. *AGRITEKNO: Jurnal Teknologi Pertanian*. 13(1): 45–53
- Shodiq, A. J. 2020. Pengolahan Limbah Sintetis Fenol dan p-Klorofenol dengan Metode Ozon-Nanobubble = Treatment of Synthetic Waste of Phenol and p-Chlorophenol with Ozone-Nanobubble Method. Skripsi, Universitas Indonesia, Depok.
- Teh, C. Y., Wu, T. Y., dan Juan, J. C. 2014. Optimization of agro-industrial wastewater treatment using unmodified rice starch as a natural coagulant. *Industrial Crops and Products*. 56: 17-26.