Vol. 3, No. 1, 2026, 143-151
e-ISSN: 3031-1101
Online at https://journal.umg.ac.id/index.php/jipl
DOI. 10.30587/jipl.v3i1.11408

Pemanfaatan Ampas Teh Sebagai Koagulan Alami: Studi Komparatif pada Penurunan Turbiditas Air Sungai Dengan Koagulan Sintetis

Utilization of Tea Waste as a Natural Coagulant: A Comparative Study on Reducing River Water Turbidity with Synthetic Coagulants

Moh. Azhar Afandy[a,*], Anugrah Flora Chyntia SI[a], Agustina Talagande[a], Arimbi Agita Sari[a], Adelia Sri Lestari S[a], Amelia Ramadhany Abidin[a], Adinda[a] , Aldi[a], Alvyan Angga Dhewa[a]

[a]Program Studi Teknik Kimia Mineral – Politeknik Industri Logam Morowali
Jl. Trans Sulawesi Labota, Bahodopi, Morowali, Sulawesi Tengah, 94974
*E-mail: azhar@pilm.ac.id

Artikel histori:

Submitted 04 Maret 2026
Revised 05 April 2026
Accepted 04 Mei2026

ABSTRAK:
Peningkatan tingkat kekeruhan air sungai akibat aktivitas domestik dan industri menjadi permasalahan lingkungan yang berdampak langsung terhadap kualitas air dan kesehatan masyarakat. Penelitian ini bertujuan untuk menguji dan membandingkan kinerja koagulan alami berbasis ampas teh dengan koagulan sintetis, yaitu tawas (alum) dan polyaluminium chloride (PAC), dalam menurunkan turbiditas air Sungai Makarti di wilayah Kecamatan Bahodopi, Morowlali, serta mengevaluasi potensi aplikasinya sebagai metode pengolahan air yang berkelanjutan. Karakteristik awal air sungai menunjukkan kondisi kualitas air yang tergolong tercemar dengan nilai turbidity sebesar 110 NTU, pH 6,38, total dissolved solids (TDS) 2224 mg/L, total suspended solids (TSS) sekitar 285 mg/L, konduktivitas 392 µS/cm, suhu 29,8 °C, serta warna kecoklatan yang mengindikasikan tingginya kandungan partikel tersuspensi dan bahan organik. Proses koagulasi dilakukan menggunakan metode uji jar test *pada kondisi operasi yang sama untuk masing-masing koagulan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tawas memberikan efisiensi penurunan turbiditas tertinggi pada kisaran (92,931-98,397 %), diikuti oleh ampas teh (91,514-96,916 %) dan PAC (72,410-96,849 %). Ampas teh menunjukkan kemampuan koagulasi yang kompetitif melalui mekanisme adsorpsi dan pembentukan jembatan partikel oleh senyawa polifenol alami. Meskipun kinerja PAC relatif lebih rendah pada kondisi penelitian ini, seluruh koagulan mampu meningkatkan kejernihan air secara signifikan. Temuan ini menunjukkan bahwa ampas teh berpotensi dikembangkan sebagai koagulan alami ramah lingkungan yang ekonomis untuk aplikasi pengolahan air sungai skala komunitas.*
Kata kunci: koagulan alami; ampas teh; turbiditas; air sungai;

ABSTRACT:
The rising turbidity of river water generated by domestic and industrial operations has emerged as an environmental issue that directly affects water quality and human health. This study requires to evaluate and compare the efficacy of natural coagulants derived from tea waste with synthetic coagulants, specifically alum and polyaluminium chloride (PAC), to minimizing the turbidity of Makarti River water at Bahodopi, Morowali and assess their potential as a sustainable water treatment solution. The preliminary attributes of the river water suggest that its quality is deemed polluted, exhibiting a turbidity of 110 NTU, a pH of 6.38, total dissolved solids (TDS) of 224 mg/L, total suspended solids (TSS) approximately 285 mg/L, conductivity of 392 µS/cm, a temperature of 29.8 °C, and a brownish color indicative of elevated levels of suspended particles and organic matter. The coagulation process was conducted utilizing the jar test method under uniform operating conditions for each coagulant. The findings indicated that alum exhibited the greatest efficacy in turbidity reduction (92,931-98,397 %), succeeded by tea waste (91,514-96,916 %) and PAC (72,410-96,849 %). Tea waste material demonstrated competitive coagulation capabilities via adsorption and particle bridge creation facilitated by natural polyphenolic chemicals. Despite PAC's somewhat inferior effectiveness in this trial, all coagulants markedly enhanced water clarity. The findings indicate that tea waste may be developed as an eco-friendly and cost-effective natural coagulant for community-level river water treatment applications.
Keywords: natural coagulant; tea waste, turbidity; river water

1. PENDAHULUAN

Air bersih merupakan kebutuhan fundamental bagi kehidupan manusia, namun kualitas sumber air permukaan di banyak wilayah Indonesia semakin menurun akibat tekanan aktivitas yang disebabkan atau dipengaruhi oleh aktivitas manusia, baik secara langsung maupun tidak langsung[1],[2]. Salah satu parameter penting dalam penilaian kualitas air adalah turbiditas, yaitu tingkat kekeruhan yang disebabkan oleh partikel tersuspensi maupun koloid[3]–[5]. Tingginya nilai kekeruhan tidak hanya menurunkan kualitas estetika air, tetapi juga berdampak pada efektivitas proses desinfeksi, meningkatkan risiko keberadaan mikroorganisme patogen, serta menghambat pemanfaatan air untuk kebutuhan domestik maupun industri [6]–[8]. Oleh karena itu, pengendalian turbiditas menjadi isu penting dalam manajemen sumber daya air, terutama di daerah yang masih mengandalkan sungai sebagai sumber air utama. Sungai Makarti, yang berada di kawasan dengan kepadatan aktivitas masyarakat dan industri di Sulawesi Tengah, merupakan contoh nyata dari permasalahan ini. Tingginya tingkat kekeruhan di sungai tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain: pembuangan limbah rumah tangga dari pemukiman padat di sepanjang bantaran, aktivitas pertambangan pasir yang meningkatkan konsentrasi sedimen halus, limbah cair dari beberapa industri yang kaya bahan organik, serta potensi kontribusi tidak langsung dari kawasan industri di Morowali yang dapat membawa partikel logam berat ke aliran sungai. Kombinasi faktor-faktor ini menyebabkan beban pencemar yang kompleks, menimbulkan masalah lingkungan dan kesehatan, serta meningkatkan biaya pengolahan air bersih bagi masyarakat sekitar.

Berbagai metode konvensional seperti koagulasi-flokulasi dengan koagulan sintetis seperti alum (tawas), ferri klorida ($FeCl_3$), ferri sulfat ($FeSO_4$) dan *polyaluminium chloride* (PAC) telah lama digunakan untuk mengatasi masalah turbiditas serta pencemaran logam-logam berat[9]–[16]. Namun, penggunaan koagulan sintetis menghadapi keterbatasan signifikan, antara lain biaya pengadaan yang relatif tinggi, potensi meninggalkan residu logam dalam air, serta dampak lingkungan akibat akumulasi lumpur kimia yang sulit ditangani[17], [18]. Kondisi ini memunculkan kebutuhan mendesak untuk mengeksplorasi alternatif koagulan alami yang lebih murah, ramah lingkungan, dan tersedia secara lokal. Dalam konteks tersebut, ampas teh muncul sebagai kandidat koagulan alami yang menjanjikan. Ampas teh merupakan limbah biomassa yang melimpah, murah, mudah diperoleh, serta mengandung senyawa polifenol, tanin, dan gugus fungsional lain yang berpotensi berinteraksi dengan partikel penyebab kekeruhan melalui mekanisme adsorpsi maupun netralisasi muatan[19]. Sejumlah penelitian terdahulu menunjukkan efektivitas bahan organik seperti biji kelor, kulit buah, dan limbah biomassa lainnya sebagai koagulan alami[20]–[22]. Namun, kajian sistematis mengenai penggunaan ampas teh, khususnya pada aplikasi langsung pada air sungai khususnya sungai Makarti dengan karakteristik pencemar yang kompleks, masih sangat terbatas. Hal ini menunjukkan celah penelitian yang perlu diisi untuk memberikan dasar ilmiah dalam pemanfaatan limbah organik sebagai solusi pengolahan air berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan untuk menguji dan membandingkan kinerja ampas teh dengan koagulan sintetis (alum dan PAC) dalam mengurangi turbiditas air Sungai Makarti, sekaligus mengevaluasi potensi aplikasinya pada skala yang lebih luas, sehingga memberikan pendekatan baru yang kontekstual, berkelanjutan, dan aplikatif dalam pengolahan air sungai. Dengan pendekatan ini, diharapkan diperoleh bukti empiris mengenai efektivitas ampas teh sebagai koagulan alami, serta analisis implikasi lingkungan dan keberlanjutannya. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi pengolahan air berbasis material lokal, sekaligus menawarkan alternatif praktis yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan bagi masyarakat di sekitar Sungai Makarti maupun wilayah lain dengan permasalahan serupa.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Preparasi Koagulan.

Tahapan preparasi koagulan ampas teh mengikuti prosedur penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Ahmed dkk, 2024 yang telah dimodifikasi[19]. Preparasi sampel ampas teh dilakukan melalui beberapa tahapan untuk memperoleh material dengan ukuran partikel seragam dan kondisi yang stabil sebelum digunakan sebagai koagulan. Sampel ampas teh terlebih dahulu disiapkan, kemudian dibilas menggunakan air keran secara berulang hingga air bilasan berubah dari warna coklat keruh menjadi jernih guna menghilangkan sisa zat terlarut dan kotoran yang masih menempel. Selanjutnya, ampas teh dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105 °C selama 12 jam untuk menghilangkan kadar air dan memastikan kestabilan material. Setelah proses pengeringan selesai, sampel didinginkan pada suhu ruang selama ± 30 menit agar mencapai kondisi termal yang stabil. Sampel kering kemudian digerus menggunakan mortar dan alu hingga diperoleh ukuran partikel yang lebih halus. Hasil penggerusan selanjutnya diayak menggunakan ayakan berukuran 100 mesh untuk memperoleh distribusi ukuran partikel yang seragam. Sampel yang telah lolos ayakan kemudian disimpan dalam plastik sampel tertutup untuk menjaga kebersihan dan mencegah penyerapan kelembaban sebelum digunakan pada tahap eksperimen berikutnya.

2.2 Prosedur Uji Koagulasi-Flokulasi

Proses uji koagulasi–flokulasi dilakukan dengan metode *jar test* untuk mengevaluasi efektivitas koagulan dalam menurunkan kekeruhan air. Koagulan sintesis yang digunakan pada penelitian ini yakni Tawas dan PAC dengan spesifikasi *Analytical Grade*. Koagulan ditimbang masing-masing sebanyak 1; 1,5; dan 2 gr sesuai variasi dosis yang telah ditentukan. Selanjutnya, setiap sampel koagulan (Tawas, PAC dan Ampas Teh) dimasukkan secara bersamaan ke dalam gelas kimia yang masing-masing berisi 1 L sampel air limbah. Proses koagulasi diawali dengan pengadukan cepat pada kecepatan 200 rpm selama 2 menit untuk memastikan dispersi koagulan dan proses netralisasi muatan berlangsung optimal. Setelah waktu pengadukan cepat tercapai, kecepatan pengadukan diturunkan menjadi 60 rpm untuk tahap flokulasi guna mendorong pembentukan flok yang lebih besar dan stabil[11]. Setelah proses pengadukan selesai, sampel dibiarkan mengalami sedimentasi selama 30 menit agar flok yang terbentuk mengendap secara sempurna. Cairan bagian atas (*supernatant*) kemudian diambil sebanyak 100 mL menggunakan pipet tanpa mengganggu endapan, dan dari volume tersebut diambil kembali 10 mL sampel untuk dianalisis nilai kekeruhannya menggunakan turbidimeter. Prosedur yang sama digunakan untuk mengukur pengaruh pH (4-6), dan pengaruh waktu koagulasi-flokulasi (10-30 menit).

2.3 Analisis Data

Analisis kekeruhan air dilakukan menggunakan metode turbidimetri dengan bantuan alat turbidimeter *(Lutron TU-2016)* untuk mnentukan tingkat kejernihan sampel sebelum dan sesudah proses koagulasi–flokulasi. Sebelum pengukuran alat turbidimeter dikalibrasi menggunakan larutan standar sesuai petunjuk pabrikan guna memastikan akurasi pembacaan nilai kekeruhan dalam satuan Nephelometric Turbidity Unit (NTU). Sampel cairan hasil proses sedimentasi diambil dari bagian atas (*supernatant*) untuk menghindari gangguan partikel endapan, kemudian dimasukkan ke dalam kuvet pengukuran yang bersih dan kering hingga batas volume yang ditentukan. Permukaan luar kuvet dibersihkan menggunakan tisu bebas serat untuk menghilangkan sidik jari atau tetesan air yang dapat memengaruhi pembacaan cahaya. Kuvet kemudian ditempatkan pada ruang pembacaan turbidimeter dan nilai kekeruhan dicatat setelah pembacaan stabil. Setiap sampel diukur minimal sebanyak tiga kali untuk memperoleh nilai rata-rata yang representatif. Data turbiditas awal dan akhir selanjutnya digunakan untuk menghitung efisiensi penurunan kekeruhan menggunakan persamaan (1).

$$\text{Efisiensi}(\%) = \frac{NTUawal - NTUakhir}{NTUawal} X\ 100\%$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Air Sungai Makarti

Analisis karakteristik awal air Sungai Makarti dilakukan untuk memperoleh gambaran kondisi kualitas air sebelum perlakuan koagulasi-flokulasi. Parameter yang diukur meliputi turbiditas, pH, *total dissolved solids* (TDS), *total suspended solids* (TSS), konduktivitas, suhu, dan warna. Hasil pengukuran disajikan pada Tabel 1. Nilai turbiditas awal air Sungai Makarti tercatat sekitar 110 NTU, jauh melebihi batas ambang yang direkomendasikan untuk air baku. Nilai ini menunjukkan tingginya kandungan partikel tersuspensi yang terdiri dari bahan organik, anorganik, serta kemungkinan mikroorganisme. Sumber utama kekeruhan diperkirakan berasal dari limbah domestic dan aktivitas pertambangan pasir yang terjadi di sekitar badan sungai. Pengadukan sedimen halus selama proses pengambilan pasir memperkaya partikel lempung dan lumpur dalam air, yang kemudian meningkatkan nilai NTU secara signifikan. Selain itu, limbah cair dari industri turut menyumbang senyawa organik dan sisa protein yang dapat menggumpal menjadi partikel koloid. Secara ekologis, kekeruhan yang tinggi menurunkan penetrasi cahaya ke dalam air, sehingga menghambat fotosintesis organisme akuatik dan menurunkan kadar oksigen terlarut[23]. Dari perspektif pengolahan air, tingginya turbiditas mempersulit proses filtrasi dan meningkatkan kebutuhan dosis koagulan. Oleh karena itu, data ini menunjukkan bahwa tahap koagulasi menjadi sangat penting dalam pengolahan air Sungai Makarti. Nilai pH air Sungai Makarti berada pada kisaran 6.38 , yang tergolong netral-sedikit asam dan masih sesuai dengan standar kualitas air kelas II (6–9). Nilai pH ini menunjukkan bahwa sungai belum mengalami pencemaran berat oleh limbah asam atau basa kuat.

Tabel 1 Parameter Kualitas Air Sungai Makarti

Parameter	Nilai Pengukuran	Satuan	Nilai Baku Mutu (PP No. 22 Tahun 2021)	Keterangan
Turbiditas	110	NTU	50	Melebihi ambang batas
pH	6.38	-	6-9	Normal
TDS	224	mg/L	1.000	Aman
TSS	285	mg/L	50	Melebihi ambang batas
Konduktivitas	392	µS/cm	34 – 500	Aman
Suhu	29.8	°C	±3 dari suhu alami	Normal
Warna	Kuning kecoklatan	-	-	Visual tinggi

Namun demikian, nilai pH sedikit asam dapat disebabkan oleh dekomposisi bahan organik dari limbah rumah tangga dan industri tahu/tempe, yang menghasilkan asam-asam organik dalam jumlah kecil. pH merupakan parameter penting dalam proses koagulasi karena memengaruhi muatan permukaan partikel koloid dan aktivitas kimia koagulan. Koagulan seperti alum dan PAC bekerja optimal pada pH 5–7, sedangkan bahan alami seperti ampas teh cenderung efektif pada pH netral. Dengan demikian, pH alami air Sungai Makarti relatif mendukung penerapan berbagai jenis koagulan tanpa memerlukan penyesuaian kimia yang signifikan.

Nilai TDS sebesar 224 mg/L menunjukkan konsentrasi zat terlarut yang masih berada jauh di bawah ambang batas untuk air baku. Kandungan TDS yang relatif rendah mengindikasikan bahwa sebagian besar partikel penyebab kekeruhan bukan berasal dari ion-ion terlarut, melainkan partikel tersuspensi yang tidak larut dalam air. Hal ini sejalan dengan temuan TSS yang tinggi, yakni 285 mg/L, jauh melampaui batas yang ditetapkan (≤ 50 mg/L). Tingginya TSS menggambarkan dominasi partikel padat seperti pasir halus, lumpur, dan bahan organik yang belum terdekomposisi sempurna. Partikel ini kemungkinan besar berasal dari aktivitas penambangan pasir di sungai serta erosi tanah di sekitar bantaran sungai.

Nilai TSS yang tinggi berkorelasi langsung dengan peningkatan turbiditas (110 NTU), karena partikel tersuspensi merupakan kontributor utama terhadap kekeruhan optik air. Dalam konteks pengolahan air, kadar TSS yang tinggi dapat memperpendek umur media filtrasi dan meningkatkan beban kerja pada unit koagulasi- flokulasi. Sementara itu, nilai konduktivitas air Sungai Makarti sebesar 392 µS/cm, yang menunjukkan bahwa kandungan ion-ion terlarut seperti kation (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}) dan anion (Cl^{-}, SO_4^{2-}, HCO_3^{-}) masih dalam batas wajar untuk air permukaan. Nilai ini mendekati ambang batas (500 µS/cm), menandakan adanya pengaruh aktivitas antropogenik yang meningkatkan kandungan garam terlarut. Beberapa kemungkinan sumber ion terlarut meliputi limbah deterjen rumah tangga, aktivitas pencucian bahan logam di area industri sekitar Morowali, serta limpasan tanah yang membawa mineral terlarut ke sungai. Konduktivitas air penting dalam menentukan daya hantar listrik dan tingkat mineralisasi, yang juga dapat memengaruhi proses koagulasi. Air dengan konduktivitas moderat seperti ini umumnya mendukung pembentukan flok karena adanya ion-ion yang menetralkan muatan negatif partikel koloid, sehingga mempercepat proses penggumpalan.

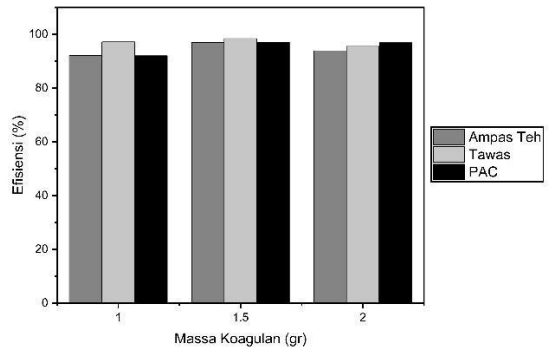
Suhu air Sungai Makarti tercatat sekitar 29.8°C, sedikit lebih tinggi dari suhu alami lingkungan (±28°C), namun masih dalam rentang wajar. Kenaikan suhu ini kemungkinan disebabkan oleh pembuangan limbah domestik dan industri yang bersuhu lebih tinggi ke sungai. Secara umum, suhu berpengaruh terhadap viskositas air dan kinetika reaksi selama proses koagulasi. Pada suhu lebih tinggi, gerakan partikel meningkat sehingga tumbukan antarpartikel lebih sering terjadi, yang dapat mempercepat pembentukan flok. Namun, suhu yang terlalu tinggi dapat menurunkan stabilitas flok yang terbentuk. Nilai suhu di Sungai Makarti masih tergolong optimal untuk proses pengolahan air konvensional. Secara visual, air Sungai Makarti menunjukkan warna kuning kecoklatan, indikasi adanya campuran partikel organik dan anorganik serta kemungkinan kehadiran senyawa humat. Warna alami dapat berasal dari pelapukan bahan organik di sepanjang sungai, namun warna yang intens sering kali menunjukkan kontaminasi dari aktivitas manusia. Limbah dari bahan organik rumah tangga dapat menghasilkan pigmen organik larut yang memberi warna khas pada air. Warna air memiliki keterkaitan erat dengan parameter kekeruhan dan TSS, serta dapat memengaruhi persepsi masyarakat terhadap kualitas air. Dalam konteks estetika maupun pengolahan, warna yang tinggi sering kali memerlukan dosis koagulan lebih besar atau kombinasi dengan proses adsorpsi untuk dihilangkan secara efektif.

Secara keseluruhan, hasil karakterisasi menunjukkan bahwa air Sungai Makarti tergolong tercemar ringan hingga sedang, terutama dari sisi kekeruhan dan padatan tersuspensi. Kondisi ini menegaskan perlunya tahap pengolahan awal *(pre-*

treatment) seperti koagulasi-flokulasi sebelum proses filtrasi dan desinfeksi. Parameter pH dan konduktivitas yang masih dalam kisaran wajar merupakan keuntungan tambahan karena tidak memerlukan penyesuaian kimia besar sebelum pengolahan.Dari sisi ekologis, tingginya TSS dan kekeruhan berpotensi menurunkan transparansi perairan, mengganggu aktivitas fotosintesis fitoplankton, serta mempengaruhi rantai makanan akuatik. Sedangkan bagi masyarakat, kondisi ini meningkatkan risiko mikrobiologis dan kimiawi pada penggunaan air sungai secara langsung. Oleh karena itu, evaluasi efektivitas berbagai jenis koagulan baik sintetis (alum dan PAC) maupun alami (ampas teh) menjadi langkah penting dalam menentukan strategi pengolahan yang efisien, ekonomis, dan berkelanjutan.

3.2 Pengaruh Massa Koagulan

Koagulasi tetap menjadi langkah esensial dalam pengolahan air limbah karena mampu menurunkan kekeruhan, warna, dan kandungan zat terlarut melalui proses destabilisasi partikel koloid. Dalam penelitian ini, pengujian dilakukan terhadap tiga jenis koagulan—ampas teh sebagai koagulan alami, aluminium sulfat (tawas) sebagai koagulan konvensional, dan polyaluminium chloride (PAC) dengan variasi massa 1 g, 1,5 g, dan 2 g. Data pada Gambar 1 menunjukkan bahwa tawas mencapai efisiensi tertinggi (97 %) pada dosis 1 g, diikuti PAC yang meraih efisiensi serupa (97 %) pada dosis 1,5–2 g, sedangkan ampas teh memperlihatkan peningkatan bertahap hingga mendekati 94 % pada dosis 2 g. Hasil ini menegaskan superioritas tawas dalam mereduksi kekeruhan pada dosis rendah berkat pelepasan ion Al^{3+} yang kemudian membentuk flok kuat berupa aluminium hidroksida [$Al(OH)_3$] melalui mekanisme *sweeping flocculation*.



Gambar 1 Hubungan antara massa koagulan dan efisiensi penurunan turbiditas

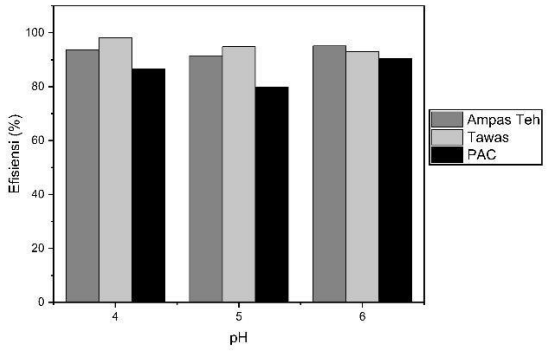
PAC, meski termasuk koagulan prapolimerisasi yang dikenal mampu membentuk flok lebih cepat dan stabil dalam rentang pH luas, membutuhkan dosis menengah hingga tinggi agar kinerjanya optimal. Puncak efisiensi PAC pada 1,5– 2 g menandakan bahwa konsentrasi gugus aktif Al-OH-Al harus cukup agar mikroflok yang stabil bisa terbentuk. Dibawah dosis tersebut, proses flokulasi belum maksimal. Di sisi lain, ampas teh, sebagai koagulan alami, menunjukkan efisiensi bersaingmeski sedikit lebih rendah dari tawas dan PAC karena kandungan tanin, polifenol, dan flavonoid yang memiliki gugus –OH/–COOH. Gugus-gugus ini berperan dalam netralisasi muatan dan bridging antarpartikel koloid, meskipun memerlukan massa lebih besar untuk mencapai kerapatan muatan efektif setara koagulan berbasis logam. Secara keseluruhan, massa koagulan sangat memengaruhi efisiensi koagulasi. Penambahan dosis pada dasarnya meningkatkan jumlah situs aktif untuk reaksi, tetapi kelebihan ion aluminium pada tawas dapat memicu restabilisasi flok sehingga efisiensi menurun setelah dosis optimum. Untuk PAC, dosis menengah diperlukan agar struktur prapolimerisasi berfungsi maksimal, sedangkan ampas teh menunjukkan peningkatan efisiensi linear tanpa indikasi restabilisasi dalam rentang dosis yang diuji. Oleh sebab itu, penentuan dosis optimum bagi setiap koagulan krusial untuk mencapai efisiensi maksimum, meminimalkan pemborosan bahan kimia, serta menekan potensi dampak lingkungan.

3.3 Pengaruh pH

Efisiensi koagulasi sangat dipengaruhi oleh jenis koagulan yang digunakan dan kondisi pH larutan. Setiap koagulan memiliki karakteristik kimia yang berbeda, sehingga efektivitasnya dalam membentuk flok sangat bergantung pada kondisi lingkungan, terutama pH. pH memengaruhi muatan permukaan partikel dan bentuk spesies koagulan dalam larutan, sehingga dapat meningkatkan atau menurunkan kemampuan koagulan dalam menggumpalkan partikel. Pada pH tertentu, koagulan dapat bekerja lebih optimal karena interaksi antar partikel dan koagulan lebih efektif dalam membentuk flok yang stabil. Dengan demikian hubungan Antara kougalan dan pH sangat penting untuk menentukan kondisi optimal dalam mencapai efisiensi koagulasi yang maksimal. Pemilihan pH 4, 5, dan 6 pada proses koagulasi-flokulasi didasarkan pada pertimbangan ilmiah terkait mekanisme netralisasi muatan dan pembentukan flok yang optimal.

Proses koagulasi sangat dipengaruhi oleh pH karena mempengaruhi spesiasi koagulan, muatan koloid, serta kestabilan flok yang terbentuk. Pada pH 4, kondisi larutan yang lebih asam memungkinkan gugus fungsional pada ampas teh, seperti –OH, –COOH, dan $–NH_2$, mengalami protonasi sehingga meningkatkan kemampuan netralisasi muatan dan mempercepat pembentukan flok. Kondisi ini juga sejalan dengan karakteristik koagulan sintetik seperti alum dan PAC yang mampu membentuk spesies aktif pada pH rendah. Sementara itu, pH 5 dipilih karena

banyak literatur melaporkan bahwa rentang ini merupakan pH optimum untuk berbagai jenis koagulan, baik alami maupun sintetik, sehingga menjadi titik tengah yang representatif untuk mengevaluasi kinerja koagulasi. Adapun pH 6 dipilih untuk menguji efektivitas proses pada kondisi yang lebih mendekati keadaan alami air sungai, sehingga tidak memerlukan banyak penyesuaian pH dan lebih praktis untuk diterapkan pada skala lapangan. Dengan demikian, pemilihan rentang pH 4–6 memungkinkan evaluasi menyeluruh terhadap performa koagulan ampas teh, alum, dan PAC, baik pada kondisi optimum terkontrol maupun pada kondisi yang lebih realistis dan ekonomis. Grafik pada gambar 2 di atas menunjukkan hubungan antara efisiensi koagulan dengan variasi pH (pH 4, pH 5, dan pH 6) pada tiga jenis koagulan yang berbeda, yaitu ampas teh, PAC(Polyaluminium Chloride), dan tawas. Tawas (aluminium sulfat) menunjukkan efisiensi tertinggi secara keseluruhan, dengan nilai efisiensi lebih dari 90% di semua kondisi pH (4, 5, dan 6). Efisiensi tertinggi dicapai pada pH 4. Hal ini menunjukkan bahwa tawas bekerja sangat efektif dalam kondisi asam ringan. Kemampuannya dalam melepaskan ion Al^{3+} yang bereaksi membentuk $Al(OH)_3$ menjadikannya sangat efisien dalam membentuk flok kuat melalui mekanisme sweeping flocculation. Ketika pH meningkat, efisiensi sedikit menurun namun tetap sangat tinggi.



Gambar 2 Hubungan antara pH dengan efisiensi penurunan turbiditas

Ampas teh sebagai koagulan alami juga menunjukkan efisiensi yang tinggi dan stabil, yaitu lebih dari 90% untuk semua pH, mirip dengan tawas. Efisiensi terbaik terlihat pada pH 6. Ini menunjukkan bahwa ampas teh memiliki performa yang cukup baik dalam rentang pH yang luas. Kandungan tanin, flavonoid, dan polifenol dalam ampas teh memberikan kemampuan adsorptif dan netralisasi muatan, yang menjadikannya alternatif koagulan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. PAC menunjukkan efisiensi terendah dibanding dua koagulan lainnya, dengan nilai antara sekitar 80-90% tergantung pH.

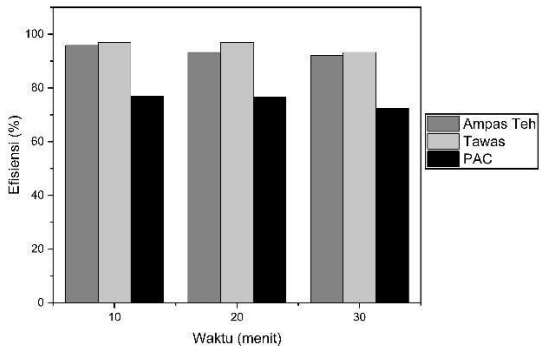
Efisiensi terendah terjadi pada pH 5. Hal ini bisa disebabkan oleh kondisi pH yang kurang ideal untuk aktivasi struktur prepolimerik dari PAC, atau oleh kurangnya kecocokan PAC dengan jenis kontaminan dalam air limbah yang diuji. Meski PAC dikenal memiliki stabilitas dan efektivitas dalam rentang pH luas, performanya dalam penelitian ini menunjukkan bahwa pengaruh lingkungan spesifik dan dosis sangat menentukan efektivitas akhirnya. Secara keseluruhan, data yang diperoleh mengindikasikan bahwa efisiensi koagulasi dipengaruhi oleh jenis koagulan dan kondisi pH larutan. Ampas teh dan tawas memiliki performa koagulasi yang lebih konsisten dan tinggi dibandingkan PAC, dan pH yang lebih rendah (asam) cenderung memberikan efisiensi yang lebih baik untuk sebagian besar koagulan.

3.4 Pengaruh Waktu Koagulasi-Flokulasi

Pemilihan waktu koagulasi-flokulasi 10, 20, dan 30 menit didasarkan pada pertimbangan untuk mengevaluasi efektivitas pembentukan flok dan penurunan turbiditas dalam rentang waktu yang umum digunakan pada pengolahan air. Waktu 10 menit merepresentasikan kondisi proses yang relative singkat, di mana partikel koloid baru mulai mengalami netralisasi muatan dan membentuk mikroflok, sehingga dapat dilihat kemampuan koagulan bekerja cepat. Pada 20 menit, proses flokulasi biasanya sudah mencapai kondisi lebih stabil dengan terbentuknya flok berukuran lebih besar, sehingga sering dianggap sebagai waktu optimum bagi banyak jenis koagulan. Sementara itu, 30 menit dipilih untuk menilai apakah penambahan waktu lebih lama benar-benar meningkatkan efisiensi atau justru mendekati titik jenuh, di mana efisiensi penurunan turbiditas tidak bertambah signifikan bahkan berpotensi menurun akibat pecahnya flok karena tumbukan berulang. Dengan demikian, ketiga variasi waktu ini memungkinkan penentuan durasi optimum yang efektif sekaligus efisien, baik untuk skala laboratorium maupun aplikasi di lapangan.

Berdasarkan efisiensi penyisihan kekeruhan dengan variasi waktu kontak 10, 20, dan 30 menit. Hasil data pada Gambar 2. yang diperoleh menunjukkan bahwa peningkatan waktu kontak berpengaruh terhadap efisiensi proses, meskipun respons setiap koagulan terhadap waktu berbeda-beda. Tawas menunjukkan efisiensi koagulasi tertinggi dan stabil pada seluruh waktu pengadukan, dengan nilai efisiensi yang selalu berada di atas 90%. Ini menunjukkan bahwa tawas mampu membentuk flok secara cepat dan efektif, bahkan pada waktu kontak yang singkat. Kinerja unggul tawas ini disebabkan oleh kemampuannya melepaskan ion Al^{3+} dalam larutan, yang kemudian membentuk flok berupa aluminium hidroksida [$Al(OH)_3$] yang sangat efisien dalam menjebak partikel-partikel tersuspensi melalui mekanisme sweeping flocculation. Stabilitas efisiensi tawas terhadap variasi waktu menunjukkan bahwa proses

koagulasi telah mencapai kestabilan flok sejak awal proses. Menariknya ampas teh sebagai koagulan alami, juga menunjukkan efisiensi yang tinggi dan kompetitif, dengan nilai efisiensi sedikit di bawah tawas namun tetap melebihi 85% untuk seluruh waktu kontak. Waktu pengadukan selama 20 menit tampaknya merupakan kondisi paling optimal, dengan sedikit penurunan efisiensi pada waktu 30 menit. Hal ini dapat dijelaskan oleh menit. Hal ini dapat dijelaskan oleh sifat senyawa aktif yang terkandung dalam ampas teh, seperti tanin dan flavonoid, yang memiliki gugus fungsional –OH dan –COOH yang dapat berinteraksi dengan partikel koloid. Interaksi ini cenderung optimal dalam waktu kontak sedang, sebelum terjadi kemungkinan dekomposisi atau kelebihan bahan organik yang justru dapat mengganggu proses flokulasi.



Gambar 3 Hubungan antara waktu koagulasi terhadap efisiensi penurunan turbiditas

PAC menunjukkan kinerja yang paling rendah dibandingkan kedua koagulan lainnya, dengan efisiensi koagulasi yang belum mampu melampaui 80% pada ketiga variasi waktu. Walaupun efisiensi PAC meningkat seiring bertambahnya waktu kontak, tren peningkatannya tidak terlalu signifikan. Ini mengindikasikan bahwa waktu kontak yang lebih lama tidak secara langsung meningkatkan pembentukan flok secara substansial. PAC sebagai koagulan prepolimerisasi memang memiliki keuntungan dalam kestabilan flok dan rentang pH operasi yang luas, namun dalam penelitian ini performanya cenderung terbatas. Hal ini dapat disebabkan oleh ketidaksesuaian karakteristik PAC dengan jenis limbah yang digunakan atau belum optimalnya kondisi seperti pH dan dosis. Tawas terbukti mampu menghasilkan flok yang stabil dalam waktu singkat, sedangkan ampas teh membutuhkan waktu optimal sekitar 20 menit untuk mencapai efisiensi tertinggi. PAC menunjukkan keterbatasan efisiensi meskipun waktu kontak ditingkatkan. Temuan ini memperkuat bahwa karakteristik masing-masing koagulan sangat memengaruhi respons terhadap variasi waktu, dan pemilihan koagulan yang tepat harus mempertimbangkan tidak hanya jenis dan dosis, tetapi juga lamanya waktu interaksi dalam sistem pengolahan air limbah.

3.5 Potensi Aplikasi dan Implikasi Lingkungan

Pemanfaatan ampas teh sebagai koagulan alami memiliki prospek yang menjanjikan untuk diaplikasikan pada skala besar, khususnya di daerah dengan ketersediaan limbah teh yang melimpah dan biaya pengolahan air yang terbatas. Sebagai limbah organik rumah tangga maupun industri, ampas teh mudah diperoleh dengan harga yang sangat murah, sehingga dapat menjadi alternatif koagulan ramah lingkungan dibandingkan dengan koagulan sintetik seperti alum dan PAC yang relatif mahal serta berpotensi menghasilkan residu berbahaya. Penerapan ampas teh dalam sistem pengolahan air berskala besar tidak hanya dapat menurunkan beban pencemaran air sungai secara efektif, tetapi juga berkontribusi pada strategi *circular economy* dengan mengubah limbah organik menjadi bahan bernilai tambah. Dari sisi keberlanjutan, penggunaan ampas teh dapat mengurangi ketergantungan pada bahan kimia sintetik, menekan biaya operasional, serta menurunkan jejak karbon dari proses pengolahan air. Secara ekonomi, teknologi ini berpotensi memberikan manfaat langsung bagi masyarakat, terutama pada wilayah pedesaan atau daerah industri yang membutuhkan pasokan air bersih dengan biaya terjangkau. Oleh karena itu, pemanfaatan ampas teh tidak hanya menawarkan solusi teknis untuk peningkatan kualitas air, tetapi juga membawa implikasi positif terhadap keberlanjutan lingkungan dan penguatan kemandirian pengolahan air berbasis sumber daya lokal.

Meskipun memiliki potensi aplikasi yang besar, pemanfaatan ampas teh sebagai koagulan alami juga menghadapi sejumlah tantangan ketika diterapkan pada skala industri. Salah satu kendala utama adalah ketersediaan bahan baku yang konsisten, baik dari sisi jumlah maupun kualitas, karena komposisi kimia ampas teh dapat bervariasi tergantung jenis teh, proses penyeduhan, dan kondisi penyimpanan. Hal ini dapat memengaruhi stabilitas kinerja koagulasi dalam jangka panjang. Selain itu, penggunaan dosis ampas teh yang berlebihan berpotensi meningkatkan kadar zat organik terlarut dalam air, yang dapat berkontribusi pada peningkatan nilai TDS atau COD serta memerlukan proses pengolahan tambahan. Dari sisi operasional, pengelolaan residu koagulasi (*sludge*) yang dihasilkan juga perlu diperhatikan agar tidak menimbulkan masalah lingkungan baru. Kontrol kualitas dalam produksi, penyimpanan, dan aplikasi ampas teh sebagai koagulan menjadi faktor penting untuk memastikan efektivitas dan keamanan penggunaannya. Oleh karena itu, penelitian lanjutan diperlukan untuk mengoptimalkan kondisi operasi, mengkaji potensi pretreatment ampas teh sebelum digunakan, serta mengevaluasi dampak jangka panjang terhadap kualitas air dan lingkungan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh menunjukkan bahwa ketiga jenis koagulan terbukti mampu menurunkan tingkat kekeruhan air secara signifikan melalui mekanisme koagulasi–flokulasi, namun dengan tingkat efektivitas yang berbeda. Tawas menunjukkan kinerja paling optimal dalam menurunkan turbiditas air Sungai Makarti, yang ditunjukkan oleh efisiensi penyisihan tertinggi (92,931-98,397 %) dan pembentukan flok yang lebih stabil. Hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme netralisasi muatan oleh ion aluminium dari tawas berlangsung lebih efektif dalam mengagregasi partikel tersuspensi penyebab kekeruhan. Ampas teh menempati urutan kedua dengan kemampuan reduksi turbiditas yang cukup tinggi (91,514-96,916 %), yang diperkirakan berasal dari keberadaan senyawa organik alami seperti tanin dan polifenol yang berperan sebagai agen koagulasi alami melalui mekanisme adsorpsi dan bridging antar partikel. Sementara itu, PAC menunjukkan kinerja yang relatif lebih rendah pada kondisi operasi penelitian ini (72,410-96,849 %), yang kemungkinan dipengaruhi oleh karakteristik air baku serta kondisi pH dan dosis yang kurang optimal bagi mekanisme hidrolisis PAC.

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa meskipun tawas masih menjadi koagulan paling efektif secara teknis, penggunaan ampas teh menawarkan keunggulan dari aspek keberlanjutan lingkungan, biaya operasional yang rendah, serta ketersediaan bahan baku yang melimpah sebagai limbah biomassa. Oleh karena itu, ampas teh memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai alternatif koagulan ramah lingkungan, terutama pada sistem pengolahan air skala komunitas atau daerah dengan keterbatasan akses terhadap bahan kimia sintetis. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah ampas teh sebagai koagulan alami merupakan pendekatan yang prospektif dalam pengolahan air permukaan. Studi lanjutan diperlukan untuk mengoptimalkan kondisi operasi, mengevaluasi kombinasi koagulan alami sintetis, serta menguji performa pada skala pilot guna mendukung implementasi praktis dalam pengolahan air sungai secara berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah mendukung pelaksanaan penelitian dan penyusunan naskah ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] K. N. Pribadi and P. Oktavia, "Pengelolaan Sumberdaya Air Terpadu Melalui Pengembangan Kebijakan Pembangunan Berkelanjutan di Cekungan Bandung," *Jurnal Perencanaan Wilayah dan Kota*, vol. 18, no. 2. pp. 1–32, 2007.

[2] V. Pramaningsih, R. Yuliawati, S. Sukisman, H. Hansen, R. Suhelmi, and A. Daramusseng, "Indek Kualitas Air dan Dampak terhadap Kesehatan Masyarakat Sekitar Sungai Karang Mumus, Samarinda," *J. Kesehat. Lingkung. Indones.*, vol. 22, no. 3, pp. 313–319, 2023, doi: 10.14710/jkli.22.3.313-319.

[3] M. Kautsar, R. Rizal Isnanto, and E. Didik Widianto, "Sistem Monitoring Digital Penggunaan dan Kualitas Kekeruhan Air PDAM Berbasis Mikrokontroler ATMega328 Menggunakan Sensor Aliran Air dan Sensor Fotodiode," *Teknol. dan Sist. Komput.*, vol. 3, no. 1, 2015.

[4] A. Khadijah and Muantulloh, "Analisis Faktor-Faktor Kualitas Dan Dampak Air Industri Terhadap Mesin Dan Kualitas Plat," *J. Ind. Serv.*, vol. 3, no. 1, pp. 98–106, 2017.

[5] R. Sanchez, M. Groc, R. Vuillemin, M. Pujo-Pay, and V. Raimbault, "Development of a Frugal, In Situ Sensor Implementing a Ratiometric Method for Continuous Monitoring of Turbidity in Natural Waters," *Sensors*, vol. 23, no. 4, 2023, doi: 10.3390/s23041897.

[6] F. Manseau, N. Bhiry, J. Molson, and D. Cloutier, "Factors affecting river turbidity in a degrading permafrost environment: the Tasiapik River, Umiujaq (Nunavik)," *Arct. Sci.*, vol. 8, no. 4, pp. 1202–1216, 2022, doi: 10.1139/as-2021-0036.

[7] E. L. Hestir, D. H. Schoellhamer, J. Greenberg, T. Morgan-King, and S. L. Ustin, "The Effect of Submerged Aquatic Vegetation Expansion on a Declining Turbidity Trend in the Sacramento-San Joaquin River Delta," *Estuaries and Coasts*, vol. 39, no. 4, pp. 1100–1112, 2016, doi: 10.1007/s12237-015-0055-z.

[8] H. Leidiyana, H. Priantoro, and F. C. R. S. Simatupang, "Perancangan Alat Pendeteksi Tingkat Kekeruhan Air Kamar Mandi Menggunakan Mikrokontroller Arduino Nano," 2019, pp. 50–55. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:216661104

[9] F. Setyawan, F. D. I. Sawali, M. A. Afandy, and M. Mustikaningrum, "Cr (VI) Removal from Aqueo Solution by Coagulation – Adsorption Integrated System," *Indones. J. Chem. Sci.*, vol. 13, no. 1, 2024.

[10] A. B. Pangeran, M. A. Afandy, and F. D. I. Sawali, "Efficiency of FeSO4.7H2O as a Coagulant on Chromium Hexavalent Removal Using Coagulation-Flocculation Process : Optimization Using Response Surface Methodology," J. Tek. Kim. Dan Lingkung., vol. 7, no. 2, pp. 123–133, 2023.

[11] M. S. Fadila, M. A. Afandy, S. Suhirman, and M. I. Al Fuady, "Studi Kinetika dan Penentuan Dosis Optimum Koagulan FeCl3 dalam Menurunkan Konsentrasi Cu2+ pada Larutan," React. J. Res. Chem. Eng., vol. 4, no. 2, pp. 60–67, 2023.

[12] Y. Sohrabi et al., "Chemical coagulation efficiency in removal of water turbidity," Int. J. Pharm. Res., vol. 10, no. 3, pp. 188– 194, 2018, doi: 10.31838/ijpr/2018.10.03.071.

[13] E. K. Tsoutsa, A. K. Tolkou, G. Z. Kyzas, and I. A. Katsoyiannis, "New Trends in Composite Coagulants for Water and Wastewater Treatment," Macromol, vol. 4, no. 3, pp. 509–532, 2024, doi: 10.3390/macromol4030030.

[14] A. D. Zand and H. Hoveidi, "Comparing aluminium sulfate and poly-aluminium chloride (PAC) performance in turbidity removal from synthetic water," J. Appl.Biotechnol. Reports, vol. 2, no. 3, pp. 287– 292, 2015.

[15] M. Musah, Y. Azeh, J. Mathew, M. Umar, Z. Abdulhamid, and A. Muhammad, "Adsorption Kinetics and Isotherm Models: A Review," Caliphate J. Sci. Technol., vol. 4, no. 1, pp. 20–26, 2022, doi: 10.4314/cajost.v4i1.3.

[16] A. Baghvand, A. D. Zand, N. Mehrdadi, and A. Karbassi, "Optimizing coagulation process for low to high turbidity waters using aluminum and iron salts," Am. J. Environ. Sci., vol. 6, no. 5, pp. 442–448, 2010, doi: 10.3844/ajessp.2010.442.448.

[17] I. M. Tijjani Usman, Y. C. Ho, L. Baloo, M. K. Lam, P. L. Show, and W. Sujarwo, "Comprehensive Review of Modification, Optimisation, and Characterisation Methods Applied to Plant-Based Natural Coagulants Treatment," Sustain., vol. 15, no. 5, 2023, [Online].Available: file:///C:/Users/Rahul/Downloads/sustainab ility-15-04484.pdf

[18] D. Diver, I. Nhapi, and W. R. Ruziwa, "The potential and constraints of replacing conventional chemical coagulants with natural plant extracts in water and wastewater treatment," Environ. Adv., vol. 13, no. May, p. 100421, 2023, doi: 10.1016/j.envadv.2023.100421.

[19] H. M. Ahmed, M. A. El-Khateeb, N. Y. Mohamed, N. A. Sobhy, and M. E. Fawzy, "Evaluation of different natural waste materials as bio-coagulants for domestic wastewater treatment," Desalin. Water Treat., vol. 317, no. January, p. 100034, 2024, doi: 10.1016/j.dwt.2024.100034.

[20] G. Kapse and S. R. Samadder, "Moringa oleifera seed defatted press cake based biocoagulant for the treatment of coal beneficiation plant effluent," J. Environ. Manage., vol. 296, p. 113202, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113 202.

[21] A. A. Azamzam et al., "Enhancing the Efficiency of Banana Peel Bio-Coagulant in Turbid and River Water Treatment Applications," Water (Switzerland), vol. 14, no. 16, 2022, doi: 10.3390/w14162473.

[22] M. C. Otálora, A. Wilches-Torres, C. R. Lara, J. A. Gómez Castaño, and G. R. Cifuentes, "Evaluation of Turbidity and Color Removal in Water Treatment: A Comparative Study between Opuntia ficusindica Fruit Peel Mucilage and FeCl3," Polymers (Basel)., vol. 15, no. 1, 2023, doi: 10.3390/polym15010217.

[23] Y. Sugianti and P. A. Lismining, "Respon Oksigen Terlarut Terhadap Pencemaran dan Pengaruhnya Terhadap Keberadaan Sumber Daya Ikan di Sungai Citarum.Jurnal Teknologi Lingkungan.19(2):203-211.," J. Teknol. Lingkung., vol. 19, no. 2, p. 203, 2018. (PBNCs) for Water and Wastewater