

**PEMANFAATAN PTC (POLITITANIUM TETRAKLORIDA) SEBAGAI
ALTERNATIF KOAGULAN DALAM DEKOLORISASI LIMBAH TEKSTIL**
*UTILIZATION OF PTC (POLYTITANIUM TETRACHLORIDE) AS AN
ALTERNATIVE COAGULANT IN DECOLORIZATION OF TEXTILE
WASTEWATER*

Wulan Safrihatini Atikah*, Khairul Umam, Satya Permana
Politeknik STTT Bandung, Jl. Jakarta No. 31 Bandung, 40272, Indonesia

*Penulis korespondensi:
Alamat Email: wulansafrihatini@yahoo.co.id

Tanggal diterima: 30 Desember 2025, direvisi: 01 Februari 2026,
disetujui terbit: 04 Februari 2026

Abstrak

Limbah industri tekstil sebagian besar terdiri dari zat warna sintetis yang cukup sulit terdegradasi di lingkungan. Pengolahan limbah cair yang sering digunakan di industri tekstil adalah koagulasi-flokulasi yang dianggap cukup mudah dan sederhana namun memproduksi lumpur yang banyak. Polititanium tetraklorida (PTC) merupakan zat baru yang dikembangkan untuk proses koagulasi-flokulasi yang menghasilkan lumpur yang dapat dimanfaatkan dengan proses lanjutan karena mengandung titanium dioksida (TiO_2). Penelitian ini menggunakan PTC pada proses koagulasi-flokulasi limbah artifisial zat warna dispersi dan reaktif, yang disiapkan dengan menambahkan larutan NaOH 200 g/L masing-masing sebanyak 21,1 mL (PTC 1), 63,3 mL (PTC 2), dan 105,5 mL (PTC 3) ke dalam 200 mL larutan TiCl_4 20%, kemudian diaplikasikan pada kedua jenis zat warna tersebut. Selain itu, variasi pH dilakukan untuk menentukan pH optimum proses koagulasi-flokulasinya. Berdasarkan hasil uji, dekolorisasi optimum terjadi pada proses koagulasi-flokulasi zat warna dispersi dengan PTC 3 dalam kondisi pH yaitu mencapai 98,58%. PTC menunjukkan nilai zeta potensial mendekati nol yang berarti mekanisme yang terjadi pada proses koagulasi adalah *sweep flocculation* dan netralisasi muatan. Nilai XRD menunjukkan lumpur hasil proses koagulasi identik dengan fase kristal anatase TiO_2 yang sesuai untuk dapat difungsikan sebagai zat fotokatalis.

Kata kunci: koagulasi, limbah cair, polititanium tetraklorida, tekstil, zat warna

Abstract

Textile industry wastewater mainly consists of synthetic dyes, which are difficult to degrade in the environment. The liquid waste treatment commonly used in the textile industry is coagulation-flocculation, which is considered simple but produces substantial sludge. Polytitanium tetrachloride (PTC) is a new substance developed for the coagulation-flocculation process that produces reusable sludge with extend process because it contains titanium dioxide (TiO_2). This study employed PTC in the coagulation-flocculation process for artificial wastewater containing disperse and reactive dyes, in which PTC was prepared by adding 200 g/L NaOH solution at volumes of 21.1 mL (PTC 1), 63.3 mL (PTC 2), and 105.5 mL (PTC 3) into 200 mL of 20% TiCl_4

solution, and subsequently applied to both types of dyes. In addition, pH variations were carried out to determine the optimum pH of the coagulation-flocculation process. Based on the test results, optimal decolourisation was achieved in the coagulation-flocculation process for disperse dyes with PTC 3 at pH 5, reaching 98,58%. PTC shows a zeta potential close to zero, indicating that the mechanisms in the coagulation process are flocculation sweep and charge neutralisation. The XRD pattern shows that the sludge resulting from the coagulation process is identical to the anatase TiO₂ crystal phase, which is suitable for photocatalysis.

Key words: coagulation, wastewater, polytitanium tetrachloride, textile, dyes

PENDAHULUAN

Limbah industri tekstil mengandung berbagai jenis pewarna, yang karena berat molekulnya yang tinggi dan strukturnya yang kompleks, mempunyai kemampuan biodegradasi yang sangat rendah¹. Sebagian besar larutan proses produksi terbuang sebagai limbah cair yang tidak diolah, sehingga berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan². Proses koagulasi-flokulasi muncul sebagai solusi optimal untuk mengatasi masalah ini.³ Koagulasi-flokulasi dipandang sebagai metode yang umumnya terjangkau bagi usaha kecil dan dapat secara efektif menghilangkan beragam polutan dari air limbah tekstil. Proses koagulasi-flokulasi dapat memainkan peran penting dalam mengurangi dampak berbahaya dari air limbah tekstil terhadap lingkungan³.

Garam aluminium (Al) dan besi (Fe) banyak digunakan sebagai koagulan yang efektif karena menunjukkan kinerja yang baik dalam menghilangkan berbagai pengotor termasuk zat organik⁴. Koagulan konvensional berupa garam aluminium dan besi menunjukkan hidrolisis yang cepat, menyebabkan pengendapan logam hidroksida dan mempersulit proses koagulasi⁵. Kelemahan utama dari penggunaan koagulan konvensional adalah produksi lumpur dalam jumlah yang banyak setelah proses pengolahan. Pengolahan lumpur setelah koagulasi-flokulasi dianggap sebagai salah satu tantangan yang paling mahal dan menimbulkan masalah

lingkungan dibandingkan seluruh proses pengolahan air⁶. Selain itu, penggunaan garam aluminium dan garam besi memiliki beberapa keterbatasan seperti (1) flok yang dihasilkan berukuran kecil, memerlukan waktu sedimentasi yang lama, (2) limbah yang dihasilkan oleh koagulan garam besi sering kali mengalami perubahan warna dan bau, dan (3) terdapat risiko kesehatan dan masalah ekonomi terkait dengan sisa aluminium dan lumpur terkoagulasi yang berbahaya⁷.

Koagulan berbasis titanium baru telah diusulkan oleh Shon, dkk. untuk menghindari masalah pembuangan lumpur⁸. Dalam beberapa dekade terakhir, koagulan garam titanium telah muncul sebagai alternatif yang menjanjikan dibandingkan koagulan garam anorganik konvensional⁹. Koagulan garam titanium menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan dengan koagulan aluminium dan besi, antara lain: (1) memiliki efisiensi penghilangan kekeruhan dan bahan organik alami yang lebih baik⁷, (2) menghasilkan flok yang lebih besar dengan tingkat pertumbuhan yang cepat⁹ dan (3) menunjukkan peningkatan kemampuan sedimentasi dan filtrasi¹⁰. Lumpur yang dihasilkan oleh koagulasi titanium dapat diubah menjadi produk sampingan yang berharga, seperti fotokatalis TiO₂¹¹.

Titanium tetraklorida (TiCl₄) diteliti sebagai koagulan alternatif dan menunjukkan kinerja yang sebanding atau lebih tinggi dibandingkan garam Al

dan Fe konvensional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hanya 10 g/L garam Ti yang tersisa di supernatan setelah flokulasi $TiCl_4$ air limbah.⁹ Selain itu, koagulan $TiCl_4$ terbukti menghasilkan flok yang lebih besar dengan laju pertumbuhan yang lebih tinggi sehingga menghasilkan pengendapan yang lebih baik. Namun, koagulan garam titanium sederhana, termasuk titanium tetraklorida ($TiCl_4$) dan titanium sulfat ($Ti(SO_4)_2$), menunjukkan beberapa kelemahan dalam pengolahan air limbah, seperti stabilitas yang buruk, pH limbah yang rendah, dan sensitivitas yang tinggi terhadap variasi kualitas air⁷. Salah satu kelemahan utama garam titanium terkait dengan netralisasi muatan (adsorpsi-destabilisasi) dari efisiensi koagulan optimal yang terjadi pada pH rendah 3,0–5,0 setelah koagulasi karena banyaknya H^+ yang dilepaskan selama proses hidrolisis titanium⁹. Mengambil inspirasi dari teknik modifikasi polimerisasi yang diterapkan pada koagulan garam aluminium dan besi, koagulan garam titanium terpolimerisasi telah berhasil disintesis. Polititanium tetraklorida (PTC) dan polititanium sulfat (PTS) diproduksi melalui polimerisasi basa masing-masing $TiCl_4$ dan $Ti(SO_4)_2$, diikuti dengan prahidrolisis. Garam titanium polimer ini meningkatkan sifat koagulasi sampai tingkat tertentu, namun mereka masih menghadapi masalah dengan volatilitas tinggi dan kinerja penyimpanan yang buruk⁷. Pengembangan garam polititanium dapat meminimalkan pelepasan H^+ melalui koagulan titanium prahidrolisis. Selain itu, serupa dengan koagulan polimer anorganik lainnya, garam polititanium mungkin memiliki kinerja lebih baik daripada garam titanium dalam hal penghilangan bahan organik dan ketergantungan pH. Selain itu, keuntungan menggunakan koagulan prahidrolisis adalah ion hidrolisis terjadi selama tahap persiapan koagulan,

sehingga menghasilkan kontrol yang lebih baik terhadap proses koagulasi¹². Selain itu, koagulan jenis ini berguna untuk mengurangi kebutuhan penyesuaian pH melalui prahidrolisis, kurang sensitif terhadap suhu rendah, dan menunjukkan kinerja sangat baik dalam menghilangkan berbagai polutan¹³. Studi pertama untuk mensintesis dan mengkaraktirasi garam polititanium sebagai koagulan pertama kali dieksplorasi oleh Zhao, dkk¹⁴.

Penelitian penggunaan PTC telah dilakukan terhadap limbah asam humat-kaolin dan menunjukkan tingkat keberhasilan yang baik, sehingga pada penelitian ini metode yang sama akan diaplikasikan terhadap limbah pewarna tekstil.

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui kemampuan dan dosis PTC sebagai alternatif koagulan pada proses koagulasi-flokulasi dalam menurunkan intensitas warna limbah zat warna tekstil.

BAHAN DAN METODA

Zat yang digunakan pada penelitian ini adalah limbah artifisial zat warna dispersi dan zat warna reaktif yang diperoleh dari Laboratorium Pencelupan Politeknik STTT Bandung dibuat dengan konsentrasi 100 mg/L dan larutan koagulan PTC dan feri klorida ($FeCl_3$). Koagulan $FeCl_3$ digunakan sebagai pembanding mewakili zat koagulan konvensional yang masih banyak digunakan. Larutan koagulan PTC dibuat dengan mencampurkan antara reagen $TiCl_4$ dan NaOH. Larutan $TiCl_4$ 99%, $FeCl_3$ p.a, NaOH p.a, HCl p.a diperoleh dari Merck.

Alat yang digunakan dalam percobaan ini diantaranya: gelas piala, pH meter, *jar test*, neraca analitik, oven, pipet ukur 1 ml, spektrofotometer dan tanur.

Percobaan dilakukan dengan dua jenis koagulan yaitu PTC dan FeCl_3 (sebagai pembanding). Penentuan dosis optimum larutan koagulan mengacu pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Checkli, dkk, 2015.¹⁵. Percobaan kedua adalah proses koagulasi-flokulasi dengan larutan koagulan PTC. Larutan TiCl_4 disiapkan dengan konsentrasi 20%. Larutan natrium hidroksida (NaOH) disiapkan dengan konsentrasi 200 g/L. Kemudian ditambahkan NaOH dengan variasi volume 21,1 mL untuk PTC 1; 63,3 mL untuk PTC 2; dan 105,5 mL untuk PTC 3 secara perlahan ke dalam 200 mL larutan TiCl_4 untuk masing-masing variasi. Pembuatan larutan dilakukan dengan metode titrasi alkali lambat dan di bawah agitasi intensif.

Pembuatan larutan artifisial zat warna dispersi dan reaktif masing-masing 100 ppm. Untuk proses koagulasi-flokulasi, ditambahkan koagulan dengan variasi pH proses disiapkan dengan mengkondisikan pH proses 2,3,4,5,6,7 dan 10 dengan penambahan CH_3COOH dan NaOH. Proses koagulasi-flokulasi dilakukan dengan metode *jar test*. Larutan sampel disiapkan sebanyak 300 mL, yang dimasukkan ke dalam gelas kimia 500 mL. Larutan koagulan PTC ditambahkan 1,5 mg/L ke dalam larutan sampel. Dilakukan putaran cepat pada *jar test* dengan kecepatan 200 rpm selama 1,5 menit. Kemudian dilakukan putaran lambat dengan kecepatan 40 rpm selama 20 menit. Terakhir, larutan dibiarkan selama 20 menit. Kemudian dilakukan analisa terhadap air sisa hasil pengolahan dan lumpurnya. Sampel yang akan diuji derajat kristalinitas harus dalam bentuk serbuk kering. Sampel didapatkan dari flok hasil proses koagulasi-flokulasi kemudian diabukan pada tanur dengan temperatur 600°C selama 30 menit.

Evaluasi yang dilakukan pada percobaan kali ini meliputi :

1. Pengujian karakteristik warna menggunakan spektrofotometer untuk mengukur pada panjang gelombang maksimumnya bertempat di Laboratorium Kimia Analisa Politeknik STTT Bandung. Panjang gelombang 590 nm untuk zat warna dispersi dan 530 nm untuk zat warna reaktif.
2. Pengujian zeta potensial di Laboratorium Sekolah Tinggi Farmasi Institut Teknologi Bandung
3. Pengujian *X-ray Deffraction* (XRD) dilakukan untuk lumpur hasil koagulasi di Laboratorium Geologi Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi dan Kelautan.

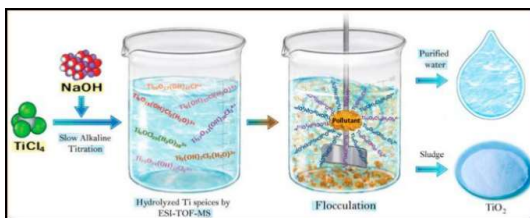
PEMBAHASAN

Pengujian Penurunan Intensitas Warna

Koagulasi-flokulasi merupakan langkah *pretreatment* yang penting dan efisien untuk pemisahan padat-cair dalam berbagai aplikasi. Proses ini akan mendestabilisasi partikel tersuspensi, memungkinkan terbentuknya kelompok yang lebih besar, atau flok, yang dapat lebih mudah dihilangkan dari cairan. Proses ini melibatkan empat mekanisme utama: pelindung muatan, dimana koagulan mengurangi gaya tolak menolak dengan menetralkan muatan permukaan; netralisasi muatan, di mana ion-ion yang bermuatan berlawanan dimasukkan ke dalam partikel agregat; pembentukan tambalan elektrostatis, yang menciptakan tempat tarik-menarik terlokalisasi dengan membentuk area dengan muatan berlawanan pada permukaan partikel; dan pembentukan jembatan antar partikel, di mana polimer rantai panjang atau bahan penghubung mengikat partikel menjadi satu. Setiap mekanisme memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi pemisahan padat-cair¹⁶.

Larutan PTC dengan nilai kebasaaan B yang berbeda (yaitu rasio molar OH/Ti) dibuat menggunakan metode titrasi basa lambat.¹⁴ Dibandingkan dengan $TiCl_4$, efisiensi kekeruhan dan penghilangan bahan organik yang lebih tinggi atau sebanding dicapai oleh PTC dengan karakteristik flok yang lebih baik dalam hal ukuran, laju pertumbuhan, dan struktur¹⁵.

PTC merupakan larutan yang dibuat dari larutan $TiCl_4$ dan NaOH dengan *basicity values B* atau perbandingan molar ratio (OH/Ti) tertentu dan disusun menggunakan metode titrasi alkali lambat¹⁴. Gambar 1 merupakan ilustrasi pembentukan polimer koagulan PTC.



Sumber : Zhao,dkk, 2013

Gambar 1 Pembentukan larutan PTC

Hasil uji pendahuluan penurunan intensitas warna dari proses koagulasi flokulasi menggunakan koagulan $FeCl_3$ dan PTC dengan kadar $TiCl_4$ dan NaOH yang berbeda, serta memvariasikan pH larutan untuk limbah artifisial zat warna dispersi dan zat warna reaktif dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengurangan intensitas warna sampel limbah artifisial zat warna dispersi dan reaktif pada berbagai jenis koagulan

Koagulan	Pengurangan intensitas warna sampel (%)					
	Zat warna dispersi			Zat warna reaktif		
	pH 4	pH 7	pH 10	pH 4	pH 7	pH 10
$FeCl_3$	2,22	1,92	0,91	3,36	2,1	0,63
PTC 1	84,02	2,12	1,31	32,77	15,97	16,39
PTC 2	84,4	8,49	2,02	30,67	15,97	17,86

PTC 3	98,58	10,92	8,49	23,74	14,5	15,34
-------	-------	-------	------	-------	------	-------

Data pada Tabel 1 menunjukkan persentase penurunan warna dan perubahan warna visual pada zat warna dispersi (warna gelap) dan zat warna reaktif (warna merah). Hasil optimum ditunjukkan dengan penyisihan warna yang diperoleh pada jenis zat warna dispersi dalam kondisi asam. Data di atas menunjukkan penggunaan jenis koagulan PTC lebih baik dibandingkan dengan $FeCl_3$ untuk pengolahan limbah pewarna tekstil.

PTC bekerja efektif terutama melalui mekanisme netralisasi muatan, yaitu dengan menetralkan muatan negatif partikel penyebab warna sehingga partikel menjadi tidak stabil dan mudah menggumpal meskipun pada dosis kecil. Sebaliknya, $FeCl_3$ bekerja dengan mekanisme *sweep flocculation*, di mana partikel organik dan partikel tersuspensi terperangkap di dalam endapan hidroksida besi yang terbentuk. Pada dosis rendah, mekanisme ini memang dapat menurunkan intensitas warna, tetapi belum cukup efektif untuk mendestabilisasi partikel secara menyeluruh. Oleh karena itu, $FeCl_3$ memerlukan dosis yang lebih tinggi agar proses transfer ion dan pembentukan endapan berlangsung optimal sehingga destabilisasi partikel menjadi lebih efektif. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa $FeCl_3$ umumnya membutuhkan dosis tinggi untuk penurunan kekeruhan.¹⁵ Berbeda dengan hal tersebut, penelitian ini menunjukkan bahwa PTC sudah efektif digunakan pada dosis yang sangat kecil, sehingga lebih efisien dan menghasilkan proses koagulasi yang lebih baik.

Koagulasi umumnya dijelaskan dalam hal netralisasi muatan dan *sweep flocculation*. Pada proses koagulasi dengan menggunakan PTC, penghilangan warna diperoleh karena netralisasi muatan antara larutan

dengan spesi Ti terhidrolisis dan molekul zat warna. Hal ini menyebabkan terbentuknya senyawa polimer PTC yang lebih banyak, sehingga akan lebih banyak memerangkap partikel pewarna tersuspensi.

Penghilangan warna zat warna dispersi memberikan hasil yang lebih baik menggunakan metode koagulasi-flokulasi. Wong, dkk, (2007) melaporkan bahwa efisiensi koagulasi dalam menghilangkan zat warna tergantung pada kelarutan zat warna. Zat warna reaktif merupakan pewarna yang bersifat larut, sedangkan zat warna dispersi tidak larut. Umumnya zat warna dispersi tersuspensi atau dalam bentuk koloid dalam larutan. Koagulasi-flokulasi efektif untuk zat warna dispersi karena zat warna ini berbentuk partikel koloid bermuatan yang dapat dinetralkan muatannya, diaglomerasikan dan dipisahkan dari air limbah.¹⁷.

Hasil uji pendahuluan pada percobaan penggunaan koagulan PTC menunjukkan hasil yang positif untuk proses koagulasi-flokulasi pada limbah artifisial zat warna dispersi. Oleh karena itu penelitian dilanjutkan dengan menggunakan limbah artifisial zat warna dispersi untuk setiap variasi.

Derajat keasaman (pH) merupakan salah satu faktor penting yang dapat mempengaruhi berlangsungnya proses koagulasi-flokulasi. Menurut para ahli, sedikitnya ada satu daerah pH tertentu untuk setiap jenis air yang akan diolah untuk memungkinkan proses koagulasi-flokulasi berlangsung dengan baik¹. Tabel 1 menunjukkan bahwa proses koagulasi dapat berlangsung pada pH asam. Oleh karena itu dilakukan pengembangan proses koagulasi dengan memvariasikan pH asam dengan rentang 3 sampai 5. Hasil dari koagulasi-flokulasi antara pengaruh pH terhadap persentase penurunan warna dapat dilihat pada Tabel 2.

Berdasarkan Tabel 2 menunjukkan bahwa koagulan PTC optimum pada pH 5 memberikan hasil penurunan intensitas warna yang baik dan optimum pada PTC 3.

Tabel 2. Pengaruh jenis PTC terhadap presentase penurunan warna

pH	Penurunan intensitas warna (%)		
	Koagulan PTC 1	Koagulan PTC 2	Koagulan PTC 3
3	74,92	72,49	98,48
4	84,02	84,40	98,58
5	90,80	88,40	98,58

Penurunan nyata dalam penyisihan zat organik oleh PTC dengan kandungan OH⁻ (dari NaOH) tinggi menunjukkan bahwa spesi Ti yang terhidrolisis dan pembentukan polimer lebih efektif dalam penghilangan zat organik dibandingkan spesi Ti yang terbentuk di tempat¹⁴. Demikian juga pada penelitian ini, makin tinggi kadar OH⁻ yang digunakan, maka kemampuan pembentukan polimer yang akan mengglomerasi partikel zat warna akan meningkat, sehingga proses penghilangan warna menjadi lebih efektif.

Pengujian Zeta Potensial

Berdasarkan hasil uji pendahuluan, pengujian zeta potensial dari proses koagulasi-flokulasi menggunakan koagulan FeCl₃ dan PTC hanya untuk limbah artifisial zat warna dispersi dapat dilihat pada Tabel 3.

Zeta potensial memberikan ukuran keseluruhan muatan permukaan semua partikel dan koloid dalam sampel air. Muatan permukaan ini menimbulkan kekuatan tolak-menolak yang mencegah agregasi dan menghasilkan sistem yang stabil.

Zeta potensial ditentukan dengan mengukur kecepatan partikel dan koloid saat terkena medan listrik. Partikel bermuatan dan koloid bermigrasi menuju partikel bermuatan dan koloid bermigrasi menuju elektroda dengan polaritas berlawanan secara proporsional kekuatan medan dan zeta potensial. Hasil penelitian Pestana, dkk., menyebutkan bahwa nilai zeta potensial antara -10 hingga +2 mV diperlukan untuk mencapai penghilangan sel alga dan bahan organik ekstraseluler secara optimal dan penulis mengklaim bahwa hal ini dapat dicapai melalui kombinasi dosis koagulan dan/atau pengaturan pH. Nilai dalam kisaran -10 hingga +5 mv menunjukkan penghilangan karbon organik terlarut secara optimal.¹⁸

Tabel 3. Hasil pengujian zeta potensial dengan koagulan FeCl₃ dan PTC pada limbah artifisial zat warna dispersi

Koagulan	Zeta potensial (mV)
<i>Ferric chloride</i> (FeCl ₃)	-31,25
<i>Polytitanium chloride</i> (PTC)	-1,59

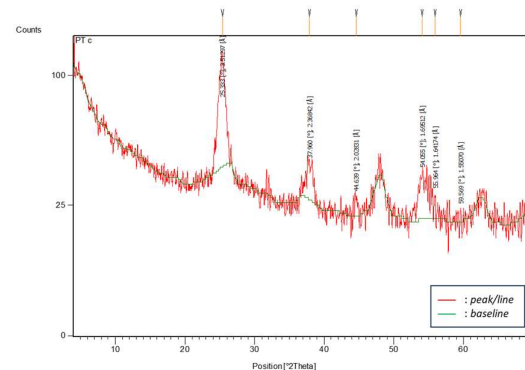
Netralisasi muatan merupakan mekanisme koagulasi yang dominan yang dikonfirmasi oleh nilai zeta potensial yang mendekati nol. Berdasarkan data pada Tabel 3, nilai zeta potensial hasil pengukuran diperoleh -1,59 mV untuk PTC dan -31,25 mV untuk FeCl₃. Hasil tersebut menunjukkan PTC mengikuti mekanisme netralisasi muatan, sehingga proses koagulasi-flokulasi berlangsung lebih efektif. Berdasarkan data pada Tabel 3 membuktikan bahwa sedikit sekali proses koagulasi-flokulasi yang terjadi pada FeCl₃. Pada sistem koloid, nilai zeta potensial yang tinggi (biasanya di atas ±30 mV) akan

memberikan stabilitas larutan untuk menolak agregasi. Sebaliknya, ketika nilai zeta potensial rendah (mendekati 0 mV) maka daya tarik menarik antar partikel melebihi daya tolak menolaknya sehingga terjadi flokulasi. Jadi, koloid dengan nilai zeta potensial tinggi adalah elektrik stabil. Sedangkan koloid dengan nilai zeta potensial rendah cenderung akan berflokulasi.¹⁸

Pengujian X-ray Diffraction

Hasil pengujian X-ray Diffraction dari proses koagulasi flokulasi menggunakan koagulan PTC untuk limbah artifisial zat warna dispersi dapat dilihat pada Gambar 2.

Pengujian XRD dilakukan pada hasil lumpur proses koagulasi menggunakan PTC. Untuk mengetahui adanya potensi TiO₂ menjadi zat fotokatalis dilakukan uji karakteristik kristalin pada lumpur tersebut.



Gambar 2 Hasil pengukuran X-ray Diffraction untuk flok hasil koagulasi-flokulasi PTC

Pola difratogram dari karakteristik menggunakan XRD untuk TiO₂ fase anatase menunjukkan puncak identitas muncul pada 2θ wilayah = 25, 38 dan 48 sedangkan puncak identitas untuk TiO₂ fase rutile menunjukkan nilai d pada wilayah = 27, 36, dan 55. Pengukuran dengan XRD menunjukkan puncak nilai d merupakan puncak identitas berupa fase anatase-rutile dimana dari sudut 2θ

dapat dilihat nilai d yang sesuai dengan puncak anatase-rutile dari masing-masing puncak dengan nilai $d = 25.33, 37.96$ dan $54,06$.¹⁹ Hal ini sesuai dengan standar JCPDS dan penelitian oleh Luttrell, dkk, (2014) yang menyatakan bahwa identifikasi fase ini krusial karena fase anatase umumnya menunjukkan efisiensi fotokatalitik yang lebih tinggi dibandingkan rutile akibat perbedaan mobilitas pembawa muatan dan kedalaman eksitasi optik. Namun, Zhang, dkk, (2014) juga menjelaskan bahwa fase campuran seringkali lebih baik daripada fase tunggal karena adanya perpindahan elektron antar fase (transfer muatan dari rutile ke anatase) yang mengurangi rekombinasi.²⁰

Hal ini menunjukkan bahwa lumpur hasil proses koagulasi berpotensi untuk difungsikan sebagai zat fotokatalis. Koagulan berbasis titanium memiliki keunggulan dibandingkan koagulan konvensional dimana lumpur yang terbentuk dapat didaur ulang dengan cara filtrasi, kemudian dikeringkan pada suhu 100°C dan dikalsinasi pada suhu 600°C untuk diperoleh produk berupa TiO_2 . TiO_2 yang terbentuk dapat digunakan sebagai bahan cat, solar sel, dan zat fotokatalis¹⁴.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis dari hasil penelitian koagulasi-flokulasi pada

limbah artifisial zat warna dispersi dan zat warna reaktif dengan menggunakan koagulan PTC dan FeCl_3 dapat diambil kesimpulan sebagai berikut: Dekolorisasi optimum terjadi pada proses koagulasi-flokulasi zat warna dispersi dengan PTC 3 dalam kondisi pH 5 yaitu mencapai 98,58%. Terbentuknya efek sinergis fase kristal anatase dan rutile pada lumpur hasil koagulasi dengan PTC menunjukkan adanya potensi TiO_2 yang terbentuk dapat difungsikan sebagai zat fotokatalis.

5.1 Saran

Berdasarkan hasil pengujian, koagulan PTC menunjukkan kinerja yang efektif dalam menurunkan intensitas warna pada limbah tekstil yang mengandung zat warna dispersi. Namun demikian, diperlukan pengembangan lebih lanjut untuk mengkaji potensi penerapan PTC pada pengolahan limbah tekstil secara lebih luas, antara lain melalui evaluasi pada variasi dan peningkatan konsentrasi zat warna. Aspek ini penting untuk dipertimbangkan tidak hanya dari sisi efektivitas pengolahan, tetapi juga dari peluang pemanfaatan lumpur hasil koagulasi yang terbentuk, mengingat material tersebut berpotensi untuk dimanfaatkan kembali sebagai bahan fotokatalis.

DAFTAR PUSTAKA

1. Verma, A.K., Dash, R.R. & Bhunia, P., A Review on Chemical Coagulation/Flocculation Technologies for Removal of Colour from Textile Wastewaters, *Journal of Environmental Management*, **93**, 154-168 (2012).
2. Mortadi, A., Hafidi, E. E., Labjar, N., Nasrellah, H., Chahid, E., Monkade, M. & El Moznine, R., Monitoring the Coagulation Mechanism and Aluminum Sulfate Impact on Textile Wastewater Treatment: Insights From Impedance Spectroscopy, *Journal of the Indian Chemical Society*, **102** (2025).
3. Santos, A.P.F., Gozzi, P., Carvalho, A.E.D., Oliveira, K.R.F.D., Caires, A.R.L., Cavalcante, R.P., Cunha, R.F., Silva, D.A.D., Guelfi, D.R.V., Silva, L.D.M.D., Silva, T.F.D., Casagrande, G.A., Oliveira, S.C.D. & Junior, A.M., Leachate Degradation Using Solar Photo-Fenton Like Process: Influence of Coagulation-Flocculation as a Pre-Treatment Step, *Separation and Purification Technology*, **289** (2022).
4. Duan, J., & Gregory, J., Coagulation by Hydrolysing Metal Salts, *Advances in Colloid and Interface Science*, **100–102**, 475-502 (2003).
5. Smotraiev, R., Nehrii, A., Koltsova, E., Anohina, A., Sorochkina, K. & Ratnaweera, H., Comparison of Wastewater Coagulation Efficiency of Pre-Polymerised Zirconium and Traditional Aluminium Coagulants. *Journal of Water Process Engineering*, **47** (2022).
6. Nassar, A.M., Smith, M. & Afifi, S., Palestinian Experience with Sewage Sludge Utilizing Reed Beds, *Water Environment Journal*, **23**, 75-82 (2009).
7. Gan, Y., Li, J., Zhang, L., Wu, B., Huang, W., Li, H. & Zhang, S., Potential of Titanium Coagulants for Water and Wastewater Treatment: Current Status and Future Perspectives, *Chemical Engineering Journal*, **406** (2021).
8. Shon, H., Vigneswaran, S. & Kim, I., Preparation of Titanium Dioxide (TiO₂) from Sludge Produced by Titanium Tetrachloride (TiCl₄) Flocculation of Wastewater. *Environment Science and Technology*. **41** (4), 1372–1377 (2007).
9. Zhao, Y.X., Gao, B.Y., Shon, H.K., Cao, B.C. & Kim, J.H., Coagulation Characteristics of Titanium (Ti) Salt Coagulant Compared with Aluminum (Al) and Iron (Fe) Salts. *Journal Hazard Mater*, **185**, 1536–1542 (2011).
10. Wang, X., Li, M., Song, X., Chen, Z., Wu, B. & Zhang S., Preparation and Evaluation of Titanium-Based Xerogel as a Promising Coagulant for Water/Wastewater Treatment. *Environment and Science Technology*, **50**, 9619–9626 (2016)
11. Gan, Y., Zhang, L. & Zhang, S., The Suitability of Titanium Salts in Coagulation Removal of Micropollutants and in Alleviation of Membrane Fouling, *Water Research*, **205** (2021).
12. Jiang, J.Q. & Graham, N.J., Pre-Polymerised Inorganic Coagulants and Phosphorus Removal by Coagulation – A Review, *Water SA.*, **24**, 237-244 (1998).
13. Cheng, W.P., Comparison of Hydrolysis/Coagulation Behavior of Polymeric and Monomeric Iron Coagulants in Humic Acid Solution, *Chemosphere*, **47**, 963-969 (2002).
14. Zhao, Y., Phuntsho, S. & Gao, B., Preparation and Characterization of Novel Polytitanium Tetrachloride Coagulant for Water Purification, *Environment and Science Technology*, **47**, 12966-12975 (2013).

15. Chekli, L., Galloux, J., Zhao, Y.K., Gao, B.Y. & Shon, H.K., Coagulation Performance and Floc Characteristics of Polytitanium Tetrachloride (PTC) Compared with Titanium Tetrachloride ($TiCl_4$) and Iron Salts in Humic Acid–Kaolin Synthetic Water Treatment. *Separation and Purification Technology*, **142**, 155-161 (2015).
16. Kang, C., Zhao, Y., Tang, C. & Bankas, O.A., Use of Aluminum-Based Water Treatment Sludge as Coagulant for Animal Farm Wastewater Treatment, *Journal of Water Process Engineering*, **46** (2022).
17. Wong, P.W., Tjoon, T.T. & Norulaini, N.A.R.N., Efficiency of the Coagulation-Flocculation Method for the Treatment of Dye Mixtures Containing Disperse and Reactive Dye, *Water Quality Research Journal*, **42 (1)** (2007)
18. Pestana, P., Chow, C., Newcombe, G. & West, Zeta Potential Measurement for Water Treatment Coagulation Control, *SA Water*, (2015)
19. Luttrell, T., Halpegamage, S., Tao, J., Ng, A., Chusuei, C. C., & Batzill, M. Why is anatase a better photocatalyst than rutile? - Model studies on epitaxial TiO_2 films. *Scientific Reports*, **4(1)**, (2014).
20. Zhang, J., Zhou, P., Liub, J., Yu, J. New understanding of the difference of photocatalytic activity among anatase, rutile and brookite TiO_2 . *Physics Chemistry. Royal Society of Chemistry*. **16**. (2014).