



Effectiveness of the Combination of Alum ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) and Calcium Hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Coagulants in the Removal of Manganese (Mn) Using the Coagulation-Flocculation Process

Efektivitas Kombinasi Koagulan Alum ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) dan Kalsium Hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) pada Penghilangan Logam Mangan (Mn) Menggunakan Proses Koagulasi-Flokulasi

Samuel Putra Mandiri Simanullang, Moh. Azhar Afandy*, Fikrah Dian Indrawati Sawali

¹⁾ Program Studi Teknik Kimia Mineral, Politeknik Industri Logam Morowali
Jl. Trans Sulawesi Desa Labota, Morowali, Sulawesi Tengah, 94974

* Corresponding author: azhar@pilm.ac.id

Received: July 31, 2024 Accepted: October 12, 2024 Published: October 31, 2024

ABSTRACT

A technique for reducing the contamination of heavy metals in wastewater is the coagulation-flocculation method. The approach has various advantages, including a simple process, readily available chemicals, inexpensive equipment costs, and an excellent capacity to remove pollutants. The goal of this research is to see how well Mn-containing wastewater can be reduced using alum and calcium hydroxide as coagulants. The adsorption capacity of the coagulant combination in the floc generation phase of the coagulation-flocculation process can also be calculated. The technique used is coagulation-flocculation, with modifications made to the coagulant content and stirring duration. The data was then evaluated using an Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) to assess the decrease Mn concentration in wastewater. According to the experiments, the combination of alum and calcium hydroxide coagulants with a mass composition ratio of alum:calcium hydroxide (150 mg:50 mg) and a stirring time of 15 minutes has the highest efficiency of 89.35% and is directly proportional to the adsorption capacity value of 446.75 mg/gram.

Keywords: Alum, Calcium Hydroxide, Coagulation-Flocculation, Coagulants, Manganese

PENDAHULUAN

Air merupakan material paling berharga yang sangat penting bagi manusia yang umumnya dimanfaatkan dalam kebutuhan minum, kesehatan, pertanian dan aplikasi industri (Sohrabi et al., 2016). Proses industrialisasi yang berlangsung sangat cepat telah menimbulkan ancaman bagi lingkungan

akibat dari limbah yang dihasilkan. Proses pembuangan limbah yang masih dilakukan dengan sembarangan akan secara langsung mencemari air dan tanah (Gautam & Saini, 2020). Pencemaran air karena berbagai komponen beracun terutama logam berat menyebabkan efek buruk pada flora dan fauna serta memiliki efek potensial pada

kesejahteraan manusia (Prabhu & Prabhu, 2018).

Penggunaan produk yang mengandung Mn secara berlebihan khususnya pada industri pertambangan dan industri manufaktur baja, *non-ferrous* metalurgi, baterai, elektroda, produksi katalis dan dapat mengarah ke polusi lingkungan (Lu et al., 2016; Patil et al., 2016; Sihaib et al., 2017). Pada tingkatan yang melebihi 0,1 mg/L, pencemaran Mn pada pasokan air akan menyebabkan rasa yang tidak enak dan akan mengalami proses bioakumulasi Mn pada air minum (Li et al., 2019; Patil et al., 2016). Tingkat pencemaran Mn Pencemaran Mn dapat menyebabkan beberapa gangguan kesehatan seperti toksisitas pada system saraf, *ataxia*, *dementia*, gangguan kecemasan dan sindrom yang menyerupai Parkinson (Selikhova et al., 2016). Konsentrasi logam Mn pada perairan di Indonesia sangat bervariasi tergantung lokasi, aktivitas industri dan dampak yang ditimbulkan akibat dari aktivitas pertambangan. Beberapa penelitian sebelumnya memperoleh kandungan Mn pada perairan Indonesia seperti di daerah Teluk Staring, Sulawesi Tenggara, konsentrasi Mn di permukaan air laut berkisar antara 0,1153 hingga 0,4077 ppm, dengan rata-rata sekitar 0,2463 ppm (Indra et al., 2020), kemudian pada daerah Teluk Lampung yang diperoleh kandungan Mn pada Sedimen perairan sekitar 107,69 ppm (Sari et al., 2016), di wilayah Perairan Kepulauan Riau sekitar 0,1084 ppm (Alimah et al., 2014), serta sekitar 1345, 03 ppm pada sedimen perairan di wilayah Teluk Marunda Jakarta (Darmansyah et al., 2020). Jika dibandingkan dengan beberapa Negara lain Seperti Amerika Serikat, China, dan India, yang menunjukkan tingkat pencemaran logam Mn yang berkisar antara 0,1-0,6 ppm pada daerah sungai dan danau yang terdapat pada beberapa Negara tersebut (Adeyeye et al., 2020; Dheeraj et al., 2024; Gaonkar et al., 2021; Liu et al., 2023; Tobiasson et al., 2016; Zhai, Yuanzheng, Xinyi Cao, Xuelian Xia, Bin Wang, Yanguo Teng, 2021). Dari data ini, terlihat bahwa konsentrasi Mn di perairan Indonesia berada dalam rentang yang serupa dengan beberapa negara lain, meskipun ada variasi tergantung pada tingkat industrialisasi dan sumber pencemaran di masing-masing lokasi.

Koagulasi-flokulasi yang diikuti dengan proses sedimentasi merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk menghilangkan logam berat pada air limbah dalam bentuk hidroksida melalui proses

pemisahan secara fisika dan sudah dipraktekkan dalam beberapa dekade terakhir (Cheng et al., 2020; Prabhu & Prabhu, 2018; Setyawan et al., 2024; Xu et al., 2021). Umumnya, senyawa kimia yang biasa digunakan sebagai koagulan adalah alum ($Al_2(SO_4)_3$, $AlCl_3$), garam besi ($FeCl_3$ dan $FeSO_4$), poli aluminium klorida (PAC) dan polimer sintesis lainnya (Fadila et al., 2023; Kristianto et al., 2022; Setyawan et al., 2024; Sohrabi et al., 2018). Metode koagulasi-flokulasi memiliki beberapa keuntungan antara lain: proses yang sederhana, bahan kimia yang tersedia secara komersil, biaya peralatan yang rendah serta memiliki kemampuan untuk menghilangkan kontaminan (Kristianto et al., 2022). Pada proses ini, muatan partikel koloid didestabilisasi dengan bantuan koagulan yang menghasilkan pembentukan flok karena terjadinya proses tumbukan partikel yang didestabilisasi dan agregasinya, yang pada akhirnya akan terpisah dengan fase cair (Gautam & Saini, 2020; Maurya & Daverey, 2018).

Salah satu jenis koagulan yang paling umum digunakan adalah alum ($Al_2(SO_4)_3$) atau sering dikenal dengan nama tawas. Komposisi kimia dari aluminium di dalam air sangat kompleks dan memungkinkan terjadinya beberapa jalur reaksi tergantung pada bahan pencemar yang terlarut di dalam air serta kontaminan koloid (Al Otaibi et al., 2019; Loganathan et al., 2024; Malik, 2018). Alum dapat dikombinasikan dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) dalam menurunkan kontaminan pada air limbah. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Duan et al., 2012), penambahan $Ca(OH)_2$ dapat memperluas kisaran pH dari koagulan alum dan meningkatkan kemampuan untuk mereduksi kontaminan pada air limbah. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh (Malik, 2018) dan (Mohamad et al., 2021) juga menjelaskan bahwa penambahan $Ca(OH)_2$ dapat membantu proses netralisasi muatan pada proses koagulasi dengan adanya ion Ca^{2+} serta dapat membantu meningkatkan proses koagulasi dengan bentuk flok yang lebih padat dan dapat dengan mudah diendapkan dalam proses sedimentasi. Sehingga kombinasi dari kedua koagulan ini diharapkan mampu meningkatkan efektifitas dari proses koagulasi flokulasi yang dijalankan pada penelitian ini.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji mengenai penggunaan metode koagulasi-flokulasi dalam proses penghilangan

logam Mn dari air limbah. Penelitian yang dilakukan oleh (Abu Amr et al., 2024) menunjukkan bahwa penggunaan metode koagulasi-flokulasi efektif dalam mengurangi logam Mn sekitar 94.10% yang berasal dari air limbah industri menggunakan kombinasi koagulan $AlCl_3$ dan koagulan alami. Selain itu, Penelitian yang telah dilakukan oleh (Wu et al., 2023) menunjukkan bahwa proses koagulasi logam Mn dari air limbah menunjukkan efektifitas sebesar 99% menggunakan beberapa jenis koagulan. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh (Yang et al., 2023) menunjukkan bahwa proses koagulasi $Fe(VI)$ efektif menghilangkan logam Mn.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menentukan efisiensi dari kombinasi antara koagulan alum dan kalsium hidroksida dalam menurunkan konsentrasi logam Mn pada air limbah. Serta dapat menentukan nilai kapasitas adsorpsi dari kombinasi koagulan tersebut dalam proses pembentukan flok pada proses koagulasi-flokulasi.

METODOLOGI

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: alum ($Al_2(SO_4)_3$), kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$), Mangan Sulfat ($MnSO_4$), dan aquades. Seluruh bahan kimia yang digunakan memiliki spesifikasi *Merck, Germany* dengan kemurnian 99%. Alat yang digunakan pada penelitian ini antara lain: *Jar-Test (cyclone)*, pH Meter (*Lutron*), *Atomic Absorption Spectrophotometry (Thermo Fishier ice 3000)*, serta peralatan-peralatan gelas yang berada di laboratorium.

Pembuatan Sampel Uji.

Penelitian ini menggunakan limbah artifisial yang disintesis di Laboratorium Mineral Politeknik Industri Logam Morowali dengan cara melarutkan padatan $MnSO_4$ dengan konsentrasi total sebesar 100 mg/L.

Pembuatan Koagulan.

Kombinasi koagulan yang digunakan pada penelitian ini di susun berdasarkan perbandingan komposisi antara Alum dan kalsium hidroksida dengan massa total koagulan sebesar 200 mg (Abdulmajeed & Oleiwi, 2015). perbandingan komposisi koagulan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan komposisi koagulan alum dan kalsium hidroksida

Koagulan	Alum ($Al_2(SO_4)_3$)	Kalsium Hidroksida ($Ca(OH)_2$)
A	150 mg	50 mg
B	120 mg	80 mg
C	100 mg	100 mg

Pengujian Jar-Test

Proses Koagulasi-Flokulasi dilakukan dengan menggunakan alat *Jar-Test* dengan menggunakan variasi perbandingan komposisi koagulan yang tertera pada Tabel 1 serta waktu flokulasi (10-25 menit). Kecepatan pengadukan dibagi dalam dua tahapan yakni pengadukan cepat selama 3 menit (200 rpm), dan kemudian diatur pengadukan lambat (60 rpm) serta waktu sedimentasi selama 60 menit (Fadila et al., 2023; Pangeran et al., 2023). Hasil yang diperoleh kemudian di analisis menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS)*.

Analisis Data

Berdasarkan hasil pengujian kadar total Mn yang telah melalui proses koagulasi-flokulasi menggunakan instrumen AAS, efisiensi penghilangan logam Mn dapat dihitung menggunakan persamaan (1).

$$\% \text{ Efisiensi} = \frac{(C_o - C_t)}{C_o} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana:

C_o = konsentrasi awal limbah (mg/L)

C_t = konsentrasi limbah pada waktu tertentu (mg/L).

Selain itu, dalam penelitian ini juga dilakukan perhitungan nilai kapasitas adsorpsi dari koagulan dalam penyerapan partikel-partikel koloid yang terbentuk. Nilai kapasitas adsorpsi dapat dihitung menggunakan persamaan (2).

$$qt = \frac{(C_o - C_t) \times V}{W} \quad (2)$$

Dimana:

qt = kapasitas adsorpsi pada waktu tertentu (mg/gram)

C_o = Konsentrasi Awal Limbah (mg/L)

C_t = konsentrasi limbah pada waktu tertentu (mg/L)

W = massa koagulan (gram)

V = Volume Limbah (L)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Komposisi Koagulan Terhadap Penurunan Logam Mn

Penelitian ini menggunakan kombinasi koagulan alum dan kalsium hidroksida untuk menurunkan kandungan pencemar logam Mn pada sampel air limbah. Penggunaan alum sebagai koagulan akan efektif ketika alkalinitas air limbah harus memadai sehingga dapat bereaksi dengan aluminium sulfat untuk menghasilkan flok hidroksida, sehingga pada penelitian ini dilakukan kombinasi antara alum dan kalium hidroksida yang berfungsi untuk meningkatkan nilai alkalinitas dari air limbah. Proses koagulasi flokulasi dilakukan menggunakan metode *jar-test* dengan pengadukan cepat (200 rpm) dan pengadukan lambat (60 rpm). Pengadukan cepat dilakukan untuk mendistribusikan koagulan secara merata ke dalam air limbah agar mempercepat proses pembentukan flok, sedangkan pengadukan lambat dilakukan untuk meningkatkan tumbukan antara partikel koloid sehingga membentuk flok yang lebih besar (Alwi et al., 2013; Maurya & Daverey, 2018). Proses pengadukan harus tetap dijaga konsistensinya agar flok tetap dalam keadaan tersuspensi dan bergerak, tetapi harus tetap memperhatikan kecepatan pengadukan agar flok yang terbentuk tidak pecah kembali. Setelah melalui proses koagulasi-flokulasi, hasil yang diperoleh kemudian di analisis menggunakan instrumen AAS yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 2. Kombinasi dari kedua koagulan ini dapat meningkatkan efektifitas pembentukan flok yang lebih besar, mempercepat pembentukan flok dan efektif pada rentang pH yang lebih luas.

Tabel 2. Hasil analisa AAS untuk konsentrasi logam Mn setelah proses koagulasi-flokulasi.

Waktu (Menit)	Konsentrasi Mn (mg/L)		
	Koagulan A	Koagulan B	Koagulan C
10	12,19	32,25	24,31
15	10,65	20,00	17,73
20	11,55	17,95	23,40
25	15,37	23,63	27,71

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada Tabel 2, Kombinasi antara koagulan alum dan kalsium hidroksida cukup efektif untuk menurunkan konsentrasi Mn di dalam air

limbah yang disebabkan oleh adanya ion-ion bermuatan yang berlawanan dengan partikel-partikel pencemar sehingga menyebabkan terjadinya destabilisasi partikel koloid. Gaya Tarik-menarik antar partikel akan saling berikatan dan membentuk mikro flok yang kemudian mengalami proses aglomerasi sehingga membentuk flok-flok yang lebih besar dan dapat mengendap dengan mudah dengan mengikuti gaya gravitasi.

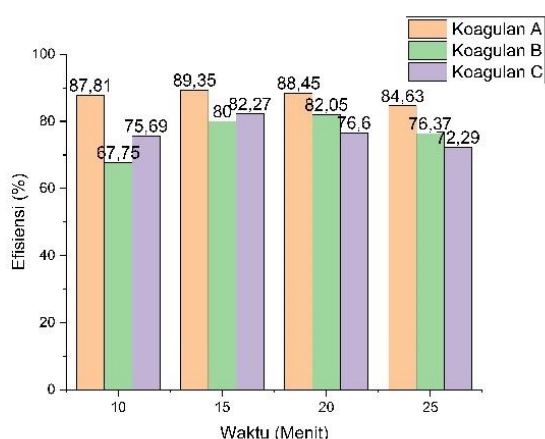
Hasil yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan bahwa, ketika proses pengadukan dilakukan dalam waktu yang cukup lama hingga melewati waktu optimumnya, gumpalan flok-flok yang sebelumnya sudah terbentuk, justru akan pecah menjadi partikel-partikel yang lebih kecil sehingga konsentrasi kontaminan di dalam limbah akan meningkat kembali. Hasil tersebut serupa dengan beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh (Fitria et al., 2022) yang menyatakan bahwa penambahan waktu pengadukan akan menurunkan efektifitas dari koagulan yang diakibatkan oleh pecahnya flok yang sudah terbentuk. Sedangkan menurut (Yu et al., 2011) menyatakan bahwa kelebihan waktu pengadukan tidak menguntungkan bagi penyisihan kontaminan dan efisiensi koagulan karena dengan meningkatnya waktu pengadukan akan mengakibatkan penurunan ukuran flok akhir.

Selain itu, hasil yang diperoleh juga menunjukkan bahwa perbandingan komposisi antara alum dan kalsium hidroksida dalam proses koagulasi-flokulasi dapat mempengaruhi efektifitas pengurangan kadar logam Mn dalam air limbah. Perbandingan yang berbeda dapat menghasilkan reaksi yang berbeda dan akhirnya mempengaruhi kinerja proses pengolahan. Koagulan A lebih banyak mengurangi konsentrasi Mn pada air limbah jika dibandingkan dengan koagulan B, dan Koagulan C. alum merupakan koagulan yang kuat dan efektif dalam membentuk gumpalan-gumpalan besar (koagulat) dengan partikel-partikel terdispersi dalam air limbah. Penggunaan alum dengan komposisi yang lebih tinggi (150 mg) dapat memberikan lebih banyak ion aluminium (Al^{3+}) yang berpartisipasi dalam reaksi koagulasi dan membentuk lebih banyak koagulat. Proses destabilisasi melibatkan monomer aluminium yang disebut sebagai muatan netralisasi atau koagulasi partikel koloid yang terjadi karena keberadaan $Al(OH)_3$. Perbandingan komposisi

pada koagulan A dapat mencapai pH yang lebih optimal untuk mengendapkan logam Mn pada air limbah. Di sisi lain, kalsium hidroksida berfungsi sebagai flokulan dan berperan dalam membantu menggabungkan koagulat menjadi flok yang lebih besar. Proses Penghilangan logam Mn pada air limbah diawali dengan proses oksidasi Mn^{2+} yang terlarut menjadi MnO_2 dengan bantuan oksigen sebagai oksidator. Kombinasi alum dan $Ca(OH)_2$ yang ditambahkan ke dalam air limbah kemudian membantu untuk proses destabilisasi serta proses agregasi partikel-partikel halus MnO_2 yang kemudian menetralkan muatan pada partikel sehingga terjadi penggumpalan untuk proses pembentukan flok. Pencampuran tersebut kemudian mendorong untuk terbentuknya flok yang lebih besar dari partikel-partikel yang berukuran lebih kecil dan selanjutnya dapat dihilangkan melalui proses sedimentasi maupun filtrasi.

Efisiensi Kombinasi Koagulan Alum-Kalsium Hidroksida

Nilai % efisiensi menyatakan presentasi dari seberapa efisien suatu koagulan dalam proses pengolahan air maupun air limbah. Perhitungan % efisiensi kombinasi koagulan alum : kalsium hidroksida dilakukan dengan cara membandingkan konsentrasi logam Mn sebelum dilakukan pengolahan dengan nilai konsentrasi Mn setelah dilakukan proses koagulasi-flokulasi. Adapun nilai % efisiensi dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Efisiensi Penghilangan logam Mn dengan metode koagulasi-flokulasi.

Berdasarkan data yang diperoleh pada gambar 1, nilai % efisiensi tertinggi dari koagulan A yakni sebesar 89,35 % pada

rentang waktu pengadukan selama 15 menit. % efisiensi tertinggi dari koagulan B yakni sebesar 82,05 % pada rentang waktu pengadukan selama 20 menit, serta nilai % efisiensi tertinggi dari koagulan C diperoleh pada waktu pengadukan selama 15 menit dengan nilai 82,27 %.

Dari data yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa koagulan A dengan komposisi alum : kalsium hidroksida (150 mg : 50 mg) memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan koagulan B dan koagulan C dalam mengurangi jumlah polutan logam Mn pada air limbah.

Perhitungan Kapasitas Adsorpsi.

Berbagai mekanisme telah diidentifikasi dalam proses destabilisasi kontaminan pada proses koagulasi-flokulasi menggunakan bahan kimia sebagai koagulan antara lain mekanisme *sweep coagulation* dan adsorpsi netralisasi muatan. Proses adsorpsi terjadi pada proses koagulasi-flokulasi dimana sebagai besar padatan atau partikel tersuspensi yang memiliki ukuran lebih kecil dan membawa muatan negatif dalam media air, sehingga partikel-partikel tersebut akan menggumpal membentuk flok yang besar. Mekanisme adsorpsi memfasilitasi agregasi atau aglomerasi gumpalan setelah penambahan agen fluktuasi yang sesuai (El-taweel et al., 2023). Nilai kapasitas adsorpsi dari masing-masing komposisi koagulan yang diperoleh pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai kapasitas adsorpsi

Waktu	Kapasitas Adsorpsi (mg/gram)		
	Koagulan A	Koagulan B	Koagulan C
10	439,05	338,75	378,45
15	446,75	400	411,35
20	442,25	410,25	383
25	423,15	381,85	361,45

Nilai kapasitas adsorpsi menyatakan seberapa banyak zat yang dapat diserap oleh material adsorben pada kondisi tertentu. Jika nilai kapasitas adsorpsi besar, menunjukkan bahwa material adsorben memiliki kemampuan yang tinggi untuk menyerap zat-zat target. Hal tersebut dapat diartikan bahwa material tersebut dapat menghilangkan polutan atau zat-zat yang tidak diinginkan dalam jumlah yang lebih besar. Sebaliknya, jika nilai kapasitas adsorpsi kecil, menunjukkan bahwa material adsorben memiliki

kemampuan yang lebih terbatas dalam menyerap zat-zat target. Berdasarkan data yang diperoleh pada tabel 2, nilai kapasitas adsorpsi akan berbanding lurus dengan % efisiensi dari suatu koagulan. Semakin tinggi efisiensi dari suatu koagulan maka akan semakin besar nilai kapasitas adsorpsinya.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa komposisi koagulan A dengan perbandingan massa alum : kalsium hidroksida (150 mg: 50 mg), memiliki efisiensi yang lebih tinggi dalam mereduksi konsentrasi logam Mn di dalam air limbah jika dibandingkan dengan komposisi koagulan B dan C dengan nilai efisiensi tertinggi sebesar 89,35 %. Hal tersebut juga berbanding lurus dengan nilai kapasitas adsorpsi dari koagulan A dalam proses adsorpsi pada netralisasi muatan oleh koagulan dengan nilai kapasitas adsorpsi sebesar 446,75 mg/gram.

REFERENSI

- Abdulmajeed, B. A., & Oleiwi, H. B. (2015). Evaluation of Alum/Lime Coagulant for the Removal of Turbidity from Al- Ahdab Iraqi Oilfields Produced Water. *Journal of Engineering*, 21(7), 145–153. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2015.07.11>
- Abu Amr, S. S., Abujazar, M. S. S., Alazaiza, M. Y. D., Albahnasawi, A., & Omer, F. (2024). Heavy metals removal from industrial wastewater using date seeds powder and aluminum chloride-based hybrid natural/chemical coagulation. *Desalination and Water Treatment*, 318(February), 100392. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100392>
- Adeyeye, O., Xiao, C., Zhang, Z., & Liang, X. (2020). State, source and triggering mechanism of iron and manganese pollution in groundwater of Changchun, Northeastern China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(10), 619. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08571-0>
- Al Otaibi, N., Bakir, E., & Afkar, E. (2019). Efficient alum and iron supported on silica matrix as gel coagulants for advance chemical treatment of dairy product effluents. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 92(3), 529–536. <https://doi.org/10.1007/s10971-019-05115-y>
- Alimah, A., Ikhwan Siregar, Y., & Amin, B. (2014). Analisis Logam Ni, Mn dan Cr pada Air dan Sedimen di Perairan Pantai Pulau Singkep Kepulauan Riau. *Dinamika Lingkungan Indonesia*, 1(2), 116–123.
- Alwi, H., Idris, J., Musa, M., & Ku Hamid, K. H. (2013). A preliminary study of banana stem juice as a plant-based coagulant for treatment of spent coolant wastewater. *Journal of Chemistry*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/165057>
- Cheng, Y., Zhang, S., Huang, T., Cheng, L., & Yao, X. (2020). Effects of coagulants on the catalytic properties of iron–manganese co-oxide filter films for ammonium and manganese removal from surface water. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118494. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118494>
- Darmansyah, K. R., Wulandari, S. Y., Marwoto, J., & Supriyantini, E. (2020). Profil Vertikal Logam Berat Tembaga (Cu), Nikel (Ni), dan Mangan (Mn) di Core Sedimen Perairan Pantai Marunda, Teluk Jakarta. *Jurnal Kelautan Tropis*, 23(1), 98. <https://doi.org/10.14710/jkt.v23i1.5667>
- Dheeraj, V. P., Singh, C. S., Sonkar, A. K., & Kishore, N. (2024). Heavy metal pollution indices estimation and principal component analysis to evaluate the groundwater quality for drinking purposes in coalfield region, India. *Sustainable Water Resources Management*, 10(1), 31. <https://doi.org/10.1007/s40899-023-01013-y>
- Duan, J., Cao, X., Chen, C., Shi, D., Li, G., & Mulcahy, D. (2012). Effects of Ca(OH)₂ assisted aluminum sulfate coagulation on the removal of humic acid and the formation potentials of tri-halomethanes and haloacetic acids in chlorination. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 24(9), 1609–1615. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)60953-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)60953-4)
- El-taweel, R. M., Mohamed, N., Alrefaey, K. A., Husien, S., Abdel-Aziz, A. B., Salim, A. I., Mostafa, N. G., Said, L. A., Fahim, I. S., & Radwan, A. G. (2023). A review of coagulation explaining its definition,

- mechanism, coagulant types, and optimization models; RSM, and ANN. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 6(February), 100358. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2023.100358>
- Fadila, M. S., Afandy, M. A., Suhirman, S., & Fuady, M. I. Al. (2023). Studi Kinetika dan Penentuan Dosis Optimum Koagulan FeCl₃ dalam Menurunkan Konsentrasi Cu²⁺ pada Larutan. *Reactor Journal of Research on Chemistry and Engineering*, 4(2), 60–67.
- Fitria, D., Komala, P. S. R. I., & Vendela, D. (2022). Pengaruh Waktu Flokulasi Pada Proses Koagulasi Flokulasi Dengan Biokoagulan Kelor Untuk Menyisihkan Kadar Besi Air Sumur. *Jurnal Reka Lingkungan*, 10(2), 165–174. <http://dx.doi.org/10.26760/rekalingkungan.v10i2.165-174>
- Gaonkar, C. V, Nasnodkar, M. R., & Matta, V. M. (2021). Assessment of metal enrichment and contamination in surface sediment of Mandovi estuary, Goa, West coast of India. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(41), 57872–57887. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14610-1>
- Gautam, S., & Saini, G. (2020). Use of natural coagulants for industrial wastewater treatment. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 6(4), 553–578. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2020.04.10>
- Indra, I., Armid, A., & Takwir, A. (2020). Distribusi Logam Mangan (Mn) PPada air Laut Permukaan Di Perairan Teluk Staring Sulawesi Tenggara. *Sapa Laut*, 5(1), 89–98. <http://ojs.uho.ac.id/index.php/jsl>
- Kristianto, H., Manurung, N., Wardhani, I. K., Prasetyo, S., Sugih, A. K., & Arbita, A. A. (2022). A kinetic, isotherm adsorption, and thermodynamic study of Congo red coagulation using Leucaena crude extract as natural coagulant. *Water Practice and Technology*, 17(6), 1332–1346. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.058>
- Li, Y., Xu, Z., Ma, H., & Hursthouse, A. S. (2019). Removal of Manganese (II) from Acid Mine Wastewater: A Review of the Challenges and Opportunities with Special Emphasis on. *Water, Ii*.
- Liu, W., Qin, D., Yang, Y., & Guo, G. (2023). Enrichment of Manganese at Low Background Level Groundwater Systems: A Study of Groundwater from Quaternary Porous Aquifers in Changping Region, Beijing, China. *Water (Switzerland)*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/w15081537>
- Loganathan, P., Kandasamy, J., Ratnaweera, H., & Vigneswaran, S. (2024). Use of wastewater alum-coagulation sludge as a phosphorus fertiliser – a mini review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(12), 18412–18421. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32497-6>
- Lu, J., Dreisinger, D., & Glück, T. (2016). Electrolytic manganese metal production from manganese carbonate precipitate. *Hydrometallurgy*, 161, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.01.010>
- Malik, Q. H. (2018). Performance of alum and assorted coagulants in turbidity removal of muddy water. *Applied Water Science*, 8(1), 1–4. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0662-5>
- Maurya, S., & Daverey, A. (2018). Evaluation of plant-based natural coagulants for municipal wastewater treatment. *3 Biotech*, 8(1), 1–4. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1103-8>
- Mohamad, N. A., Hamzah, S., Che Harun, M. H., Ali, A., Rasit, N., Awang, M., Rahman, W. R. W. A., Azmi, A. A. A. R., Abu Habib, A. A., Amri Zahid, M. S., Fahmi Mustofa, A. A., Latfi, S. A., Aripin, S. M., & Saad, R. (2021). Integration of copperas and calcium hydroxide as a chemical coagulant and coagulant aid for efficient treatment of palm oil mill effluent. *Chemosphere*, 281(October 2020), 130873. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130873>
- Pangeran, A. B., Afandy, M. A., & Sawali, F. D. I. (2023). Efficiency of FeSO₄·7H₂O as a Coagulant on Chromium Hexavalent Removal Using Coagulation-Flocculation Process: Optimization Using Response Surface Methodology. *Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan*, 7(2), 123–133.
- Patil, D. S., Chavan, S. M., & Oubagaranadin, J. U. K. (2016). A review of technologies for manganese removal from wastewaters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 468–487. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.11.0>

- Prabhu, P. P., & Prabhu, B. (2018). A Review on Removal of Heavy Metal Ions from Waste Water using Natural/ Modified Bentonite. *MATEC Web of Conferences*, 144, 1–13. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201714402021>
- Sari, F., Hidayat, D., & Septiani P, D. (2016). Kajian Kandungan Logam Berat Mangan (Mn) dan Nikel (Ni) pada Sedimen di Pesisir Teluk Lampung (Study of Heavy Metal Manganese (Mn) and Nickel (Ni) in the Gulf Coast from Around the Gulf of Coast Lampung. *Analit: Analytical and Enviromental Chemistry*, 1(01), 17–25.
- Selikhova, M., Tripoliti, E., Fedoryshyn, L., Matvienko, Y., Stanetska, H., Boychuk, M., Komnatska, I., Lees, A. J., & Sanotsky, Y. (2016). Analysis of a distinct speech disorder seen in chronic manganese toxicity following Ephedrone abuse. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, 147, 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2016.05.027>
- Setyawan, F., Sawali, F. D. I., Afandy, M. A., & Mustikaningrum, M. (2024). Cr (VI) Removal from Aqueous Solution by Coagulation – Adsorption Integrated System. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 13(1).
- Sihaib, Z., Puleo, F., Garcia-Vargas, J. M., Retailleau, L., Descorme, C., Liotta, L. F., Valverde, J. L., Gil, S., & Giroir-Fendler, A. (2017). Manganese oxide-based catalysts for toluene oxidation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 209, 689–700. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.03.042>
- Sohrabi, Y., Rahimi, S., Nafez, A. H., Mirzaei, N., Bagheri, A., Ghadiri, S. K., Rezaei, S., & Charganeh, S. S. (2018). Chemical coagulation efficiency in removal of water turbidity. *International Journal of Pharmaceutical Research*, 10(3), 188–194. <https://doi.org/10.31838/ijpr/2018.10.03.071>
- Sohrabi, Y., Saeidi, M., Biglari, H., Rahdar, S., Baneshi, M. M., Ahamadabadi, M., Narooie, M. R., Khaksefidi, R., & Alipour, V. (2016). Heavy metal concentrations in water resources of rural areas of Kermanshah, Iran. *IIOAB Journal*, 7, 542–546.
- Tobiason, J. E., Bazilio, A., Goodwill, J., Mai, X., & Nguyen, C. (2016). Manganese Removal from Drinking Water Sources. *Current Pollution Reports*, 2(3), 168–177. <https://doi.org/10.1007/s40726-016-0036-2>
- Wu, Y. C., Kan, C. C., Lee, S. C., & Yang, F. Y. (2023). Water Treatment of Manganese Oxides and Organic Matter through Pre-Oxidation and Coagulation/Sedimentation †. *Engineering Proceedings*, 55(1). <https://doi.org/10.3390/engproc2023055059>
- Xu, J., Wang, W., & Zhao, Y. (2021). Phenolic compounds in whole grain sorghum and their health benefits. *Foods*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/foods10081921>
- Yang, B., Rashid, S., Graham, N., Li, G., & Yu, W. (2023). In-depth study of the removal of Mn(II) by Fe(VI) treatment and the profound influence of NOM on floc formation and properties. *Water Research*, 247, 120840. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120840>
- Yu, W. zheng, Gregory, J., Campos, L., & Li, G. (2011). The role of mixing conditions on floc growth, breakage and re-growth. *Chemical Engineering Journal*, 171(2), 425–430. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.03.098>
- Zhai, Yuanzheng, Xinyi Cao, Xuelian Xia, Bin Wang, Yanguo Teng, and X. L. (2021). Elevated Fe and Mn Concentrations in Groundwater in the Mechanisms Involved. *Agronomy*.