

ANALISIS PERBANDINGAN PENGASIDAN UNTUK PEMULIHAN MAKSIMUM ALUMINIUM DARIPADA ENAP CEMAR AIR SINTETIK DAN LARUT LESAP

Hanee Nafees Bin Suslan¹, Nik Azimatolakma Awang^{1,*}

¹Pusat Pengajian Kejuruteraan Awam, Kampus Kejuruteraan Tuanku Syed Sirajuddin
Universiti Sains Malaysia 14300 Nibong Tebal, Pulau Pinang, Malaysia

*Pengarang koresponden: cenikazimatol@usm.my

Abstrak

Pemulihan koagulan daripada sisa rawatan air dan larut lesap memberikan peluang yang besar untuk ekonomi kitaran dalam pengurusan air sisa. Kajian ini menyiasat kecekapan pemulihan aluminium sulfat (tawas) melalui pengasidan daripada dua matriks enap cemar yang berbeza, air sintetik (berasaskan kaolin) dan larut lesap mentah. Pada mulanya, prestasi pembekuan telah dioptimumkan dan mendedahkan bahawa walaupun 20 mg/L tawas mencapai lebih 90% penyingkiran Jumlah Pepejal (JP) dalam air sintetik, matriks larut resap kompleks memerlukan 100 mg/L untuk mencapai 73% Permintaan Oksigen Kimia (POK) dan 70% JP. Seterusnya, enap cemar yang dihasilkan telah diasidkan menggunakan asid sulfurik (H_2SO_4) pada tahap kemolaran 0.9 M, 1.35 M, dan 1.8 M. Analisis Spektroskopi Pancaran Plasma Gandingan Aruhan (SPPGA) mengenal pasti 1.35 M sebagai dos optimum untuk larut lesap, memperoleh 1148.41 mg/L Al, manakala dos yang lebih tinggi (1.8 M) membawa kepada penurunan pemulihan yang ketara disebabkan oleh pemendakan semula logam. Sebaliknya, sisa air sintetik mencatatkan kadar pemulihan sebanyak 114.07% pada kemolaran 1.8 M yang menunjukkan pencernaan struktur tanah liat kaolin ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$). Pengimejan Mikroskopi Elektron Imbasan Pancaran Medan (MEIPM) mengesahkan keputusan ini, menunjukkan transformasi enap cemar kaolin kepada gugusan kristal yang sangat teratur selepas pengasidan, manakala sisa larut lesap sebahagian besarnya kekal amorfus. Penemuan ini menunjukkan bahawa walaupun pengasidan merupakan kaedah pemulihan yang berdaya maju, kerumitan organik larut resapan dengan ketara menghalang penghabluran semula berbanding enap cemar berasaskan tanah liat bukan organik.

Kata Kunci: aluminium sulfat, enap cemar, larut lesap, pemulihan,

Article history:

Submitted: 02/02/2026; Revised: 12/05/2026; Accepted: 30/06/2026; Online: 30/06/2026

PENGENALAN

Permintaan global yang pesat untuk air bersih dan peningkatan eksponen dalam sisa pepejal telah memberi tekanan yang besar kepada kemudahan rawatan air dan air sisa. Dalam loji rawatan air konvensional (LRA) dan sistem rawatan larut lesap tapak pelupusan sampah, proses koagulasi-flokulasi sangat bergantung pada penyingkiran pepejal terampai, kekeruhan, bahan organik dan logam berat daripada air mentah dan larut resap secara berkesan (Igwegbe et al. 2024). Bahan kimia berasaskan aluminium, terutamanya aluminium sulfat (tawas) dan polialuminium klorida, adalah koagulan yang paling banyak digunakan kerana kesederhanaan dalam operasi dan kosnya yang rendah (Boaventura et al. 2000, Hamzah et al. 2022, Mora-LeÓN et al. 2022.). Walau bagaimanapun, penggunaan koagulan ini yang meluas mengakibatkan cabaran alam sekitar yang besar iaitu penjana enap cemar rawatan air dalam kuantiti yang besar (Mora-LeÓN et al. 2022, Shawal et al. 2023).

Di seluruh dunia, dianggarkan hampir 10,000 tan enap cemar rawatan air dihasilkan setiap hari (Mora-LeÓN et al. 2022, Basri et al. 2019). Di Malaysia sahaja, penjana enap cemar tahunan mencecah kira-kira dua juta tan (Basri et al. 2019). Enap cemar ini biasanya dilupuskan di tapak pelupusan sampah sanitari atau dilepaskan terus ke dalam badan air. Oleh kerana enap cemar mengandungi bahan organik pekat, mikroorganisma patogen, garam bukan organik dan logam berat (seperti plumbum, zink, kromium dan merkuri), pelupusan yang tidak dibuat dengan kaedah yang betul menimbulkan ancaman pencemaran yang teruk kepada tanah dan ekosistem akuatik di sekeliling (Mora-LeÓN et al. 2022, Shawal et al. 2023). Tambahan pula, enap cemar tawas dikategorikan sebagai sisa terjadual di negara seperti Malaysia, bermakna ia memerlukan pengendalian khusus dan sangat mahal. Dianggarkan bahawa pengurusan dan pelupusan enap cemar tawas negara di kemudahan tapak pelupusan sampah yang diluluskan boleh melebihi RM10 bilion setiap tahun (Hamzah et al. 2022).

Untuk merapatkan jurang antara jumlah enap cemar yang dihasilkan dengan keperluan untuk mengurangkan pencemaran alam sekitar, pemulihan aluminium daripada enap cemar telah menjadi tumpuan kritikal (Hamzah et al. 2022). Pelbagai kaedah telah diterokai untuk memulihkan koagulan daripada sisa rawatan air, termasuk pengasidan, pembasifikasi (pengalkalisan), pertukaran ion, pemisahan membran dan elektrodialisis. Antaranya, pemisahan membran dan pertukaran ion secara amnya dianggap terlalu mahal dan sangat tidak praktikal untuk mengekstrak tawas dalam jumlah yang besar. Sebaliknya, kaedah pengasidan menggunakan pelarut larut lesap seperti asid sulfurik, hidroklorik atau nitrik telah diiktiraf secara meluas sebagai pendekatan yang paling cekap dan kos efektif (Hamzah et al. 2022, Mora-LeÓN et al. 2022, Shawal et al. 2023).

Pengasidan berfungsi dengan menurunkan pH enap cemar, yang boleh meneutralkan flok aluminium hidroksida dan berjaya melarutkan aluminium yang terperangkap kembali ke dalam bentuk cecair yang boleh diasingkan dan dituai. Melaksanakan kaedah pengasidan untuk mendapatkan semula tawas memberikan beberapa manfaat penting untuk industri rawatan air dan air sisa. Pertama, dengan mengitar semula aluminium yang diperolehi sebagai koagulan alternatif, loji rawatan dapat mengurangkan kebergantungan mereka terhadap pembelian koagulan komersial baru dengan ketara, sekali gus menurunkan kos operasi (Hamzah et al. 2022, Mora-LeÓN et al. 2022). Kedua, proses pengasidan secara semula jadi melarutkan sejumlah besar pepejal terampai, yang membawa kepada pengurangan yang ketara dalam jumlah baki keseluruhan enap cemar. Pengurangan jumlah ini diterjemahkan secara langsung kepada penjimatan yang besar dalam penyahairan enap cemar, pengangkutan dan kos pelupusan tapak pelupusan akhir. Akhirnya, pemulihan koagulan mengubah pengurusan sisa daripada model pelupusan linear tradisional ke arah ekonomi kitaran yang mampan dan mengubah sisa berbahaya kepada sumber yang berharga sambil meminimumkan impak alam sekitar (Mora-LeÓN et al. 2022, Shawal et al. 2023). Dengan mendapatkan semula koagulan daripada enap cemar LRA, industri rawatan air dapat mengurangkan kebergantungan mereka terhadap koagulan komersial dengan ketara, menurunkan kos operasi dan pelupusan mereka dan menggalakkan rangka kerja alam sekitar yang mampan untuk pengurusan sisa.

Tujuan utama kajian ini adalah untuk menilai kebolehlaksanaan sistem pemulihan koagulan dengan mengekstrak aluminium sulfat daripada sisa rawatan melalui pengasidan. Memandangkan kepelbagaian sisa industri yang terhasil, kajian ini terlebih dahulu menetapkan keadaan pembekuan optimum untuk merawat air sintetik dan larut resapan untuk menghasilkan precursor enap cemar yang konsisten. Seterusnya, kajian ini menyiasat kecekapan pemulihan yang dimediasi asid sulfurik, khususnya mengukur bagaimana dos asid yang berbeza-beza mempengaruhi kadar pemulihan akhir aluminium. Dengan merapatkan jurang antara rawatan awal dan pemulihan sumber, kerja ini bertujuan untuk mengubah hasil sampingan rawatan kepada input kimia yang mampan.

METODOLOGI

Persempelan Larut Lesap

Sampel larut lesap mentah telah dikumpulkan dari Tapak Pelupusan Sampah Alor Pongsu (TPSAP), Perak. TPSAP telah beroperasi sebagai tapak pelupusan sisa pepejal perbandaran sejak tahun 2000 dan dianggap sebagai kemudahan yang matang dan stabil. Tapak ini terdiri daripada tiga kolam larut resapan dan kawasan pembuangan utama seluas 10 ekar, di mana kolam hanya menerima rawatan anaerobik sebelum dilepaskan. Untuk kajian ini, larut resapan telah disampel terus dari tempat pengumpulan larut resapan mentah yang ditetapkan seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1 menggunakan bekas HDPE yang telah dibersihkan terlebih dahulu. Setiap bekas dibilas dengan larut resapan sebelum pensampelan, diisi di pertengahan aliran untuk mengelakkan serpihan permukaan dan pepejal yang mendap, kemudian segera ditutup dan disimpan pada suhu 4°C untuk dihantar ke makmal. Semua sampel dianalisis dalam masa 24 jam untuk memastikan integriti data.



Rajah 1: Lokasi persampelan larut lesap di TPAP

Penyediaan Air Sintetik

Air sisa sintetik yang digunakan dalam kajian ini disediakan menggunakan tanah liat Kaolin, sejenis silikat aluminium terhidrat yang biasa digunakan untuk mensimulasikan air permukaan yang mempunyai kekeruhan tinggi kerana ciri-ciri zarahnya yang stabil dan kebolehulangannya. Pada peringkat awal, suspensi stok pekat dihasilkan dengan melarutkan 5.0 g serbuk Kaolin dalam 1 L air suling. Campuran ini dikacau secara mekanikal selama 30 minit untuk memastikan penyebaran zarah tanah liat yang seragam. Selepas pencampuran, suspensi dibiarkan tidak diganggu selama 24 jam untuk membolehkan penghidratan dan penstabilan Kaolin sepenuhnya. Bagi setiap percubaan, isipadu suspensi stok yang diukur akan dicairkan dengan air paip untuk mendapatkan kekeruhan awal antara 150 dan 200 NTU. Pendekatan ini membolehkan pelarasan kekeruhan yang konsisten merentasi semua eksperimen untuk menyamai ciri-ciri air semula jadi. Sebelum menjalankan ujian balang, pencirian air sisa sintetik dilakukan dengan mengukur parameter kualiti air utama, termasuk pH, Permintaan Oksigen Kimia (POK), dan Jumlah Pepejal (JP). Pengukuran garis dasar ini direkodkan untuk menjamin kebolehbandingan data serta menyokong analisis prestasi rawatan pada peringkat seterusnya.

Prosedur Koagulasi-Flokulasi (Ujian Balang)

Eksperimen koagulasi-flokulasi telah dijalankan menggunakan alat ujian balang standard (Penguji Balang Pelarutan Model JL T6) yang dilengkapi dengan enam bikar silinder 1-L dan bilah pendesak segi empat tepat berukuran 2.5×7.5 cm. Bagi setiap uji kaji, 1000 mL sampel, sama ada larut lesap mentah atau air sisa sintetik dimasukkan ke dalam setiap bikar. Nilai pH awal kemudiannya diukur menggunakan probe pH yang telah dikalibrasi. Bagi mengelakkan pencemaran silang, probe dibilas dengan teliti dengan air suling antara setiap pengukuran.

Aluminium sulfat (tawas) digunakan sebagai koagulan utama dan dimasukkan ke dalam bikar menggunakan buret untuk kawalan isipadu yang tepat. Sejurus selepas penambahan tawas, pH setiap bikar diselaraskan kepada julat sasaran (pH 6.0–7.5) menggunakan asid sulfurik (H_2SO_4) untuk mengoptimumkan prestasi koagulasi. Proses pencampuran terdiri daripada dua peringkat, iaitu pencampuran pantas pada 80 rpm selama 1 minit untuk memastikan penyebaran koagulan yang seragam, diikuti dengan pencampuran perlahan pada 30 rpm selama 15 minit untuk memudahkan pembentukan flok dan penggumpalan zarah. Selepas pencampuran dilakukan, pendesak dinaikkan, dan flok dibiarkan mendap tanpa diganggu selama 20 minit. Selepas pemendapan, supernatan dikumpulkan dari 2 cm bahagian atas setiap bikar bagi mengelakkan gangguan terhadap pepejal yang telah mendap. Rajah 2 menunjukkan persediaan Ujian Balang untuk sampel air sintetik dan larut resapan. Kekeruhan akhir, POK, dan JP diukur daripada supernatan ini dan digunakan untuk mengira kecekapan penyingkiran yang dicapai di bawah setiap keadaan rawatan.

Penentuan Permintaan Oksigen Kimia (POK) dan Jumlah Pepejal (JP)

Semua prosedur analisis yang dijalankan mengikut Kaedah Standard bagi Pemeriksaan Air dan Air Sisa (APHA, 2005). POK ditentukan menggunakan Kaedah Titrimetrik Refluks Tertutup Standard (5220 C), yang sesuai bagi kepekatan dalam julat 40–400 mg/L. Sampel air larut lesap dicairkan jika perlu bagi memastikan bahawa nilai POK yang diukur adalah di dalam julat analisis yang dibenarkan. JP pula dinilai mengikut Kaedah 2540 B.



Rajah 2: Persediaan Ujian Balang (a) Sampel larut lesap, (b) Sampel air sintetik

Penyediaan Enap Cemar dan Pemulihan Aluminium melalui Pengasidan

Kaedah yang digunakan untuk penyediaan enap cemar dan pemulihan aluminium dijalankan berdasarkan kajian oleh Basri et al. (2019). Enap cemar yang di kumpul daripada Ujian Balang (pada keadaan optimum) dikeringkan terlebih dahulu menggunakan ketuهار pada suhu 105°C selama 24 jam untuk membuang kelembapan sisa dan mencapai berat yang malar. Enap cemar yang telah kering kemudiannya diayak melalui jaringan 2 mm untuk menghapuskan serpihan kasar dan seterusnya dihancurkan dan disaring menggunakan penapis 16 jaringan untuk mendapatkan saiz zarah yang seragam dan sesuai untuk pelarutan asid. Enap cemar yang diproses disimpan di dalam bekas kedap udara sebelum ianya digunakan. Apabila hendak digunakan, jisim 300 g enap cemar yang telah dikeringkan ditimbang dan dicampurkan dengan 1000 mL air suling. Kemudiannya, enap cemar melalui proses pengadukan mekanikal pada 30 rpm selama 30 minit untuk menghasilkan suspensi enapcemar yang dihomogenkan.

Aluminium diekstrak semula daripada enap cemar menggunakan asid sulfurik (H_2SO_4) sebagai agen pengasidan. Pengasidan dijalankan menggunakan kepekatan H_2SO_4 tertentu antara 0.45 M hingga 1.80 M untuk melarutkan aluminium daripada matriks enap cemar. Setiap campuran asid-enap cemar dikacau pada 30 rpm selama 30 minit pada suhu terkawal 10°C untuk mengoptimumkan pembubaran aluminium. Selepas pencampuran enap cemar dengan H_2SO_4 , nilai pH tindak balas awal dicatatkan pada kira-kira 3.3. Tempoh interaksi selama 30 minit diperuntukkan bagi memastikan tindak-balas asid-enap cemar berlaku dengan cekap. Selepas pengasidan, campuran ditapis secara berurutan menggunakan kertas penapis 16- μm dan kemudiannya ditapis menggunakan penapis 12- μm untuk membuang sisa pepejal terampai yang mungkin mengganggu kuantifikasi aluminium. Penapisan vakum digunakan dalam langkah terakhir untuk meningkatkan kejernihan filtrat. Proses penapisan ini diulang sebanyak dua kali untuk memastikan penyingkiran zarah yang lengkap. Filtrat dipelihara pada suhu 10°C dan dibawa ke suhu bilik ($27\text{--}30^{\circ}\text{C}$) sebelum dianalisis bagi memenuhi keperluan pengukuran untuk Spektroskopi Pancaran Plasma Gandingan Aruhan (SPPGA). Larutan piawai disediakan menggunakan piawai berbilang unsur V23 untuk tujuan kalibrasi. Kepekatan aluminium kemudiannya diukur menggunakan ICP-OES setelah selesai proses kalibrasi dan pencairan. Tahap pemulihan aluminium yang optimum dicapai pada suhu 10°C , kelajuan pengadukan 30rpm, dan 30 minit tempoh pencampuran.

Mikroskopi Elektron Imbasan Pancaran Medan (MEIPM)

Morfologi permukaan enap cemar telah diperiksa menggunakan Mikroskopi Elektron Pengimbasan Pelepasan Medan (MEIPM) untuk menilai perubahan struktur sebelum dan selepas rawatan. Sampel enap cemar yang dikumpulkan selepas ujian balang dan selepas proses pengasidan dikeringkan terlebih dahulu dalam ketuهار pada suhu 60°C sehingga beratnya malar untuk mengelakkan artifak berkaitan kelembapan. Sampel yang telah dikeringkan dikisar perlahan-lahan untuk mendapatkan serpihan yang seragam dan dipasang pada ketulan aluminium menggunakan pita karbon konduktif. Setiap sampel kemudiannya disalut dengan lapisan emas nipis untuk meningkatkan kekonduksian elektron dan kejelasan pengimejan. Pengimejan MEIPM telah dilakukan pada pembesaran yang berbeza-beza untuk memerhatikan perubahan dalam struktur zarah, kekasaran permukaan dan integriti flok yang terhasil daripada pembekuan-flokulasi dan larut lesap asid. Pemerhatian mikrostruktur ini

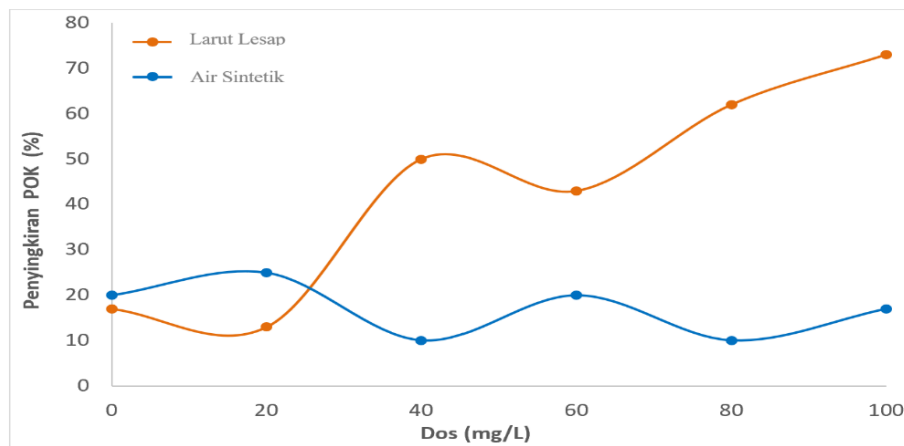
digunakan untuk menyokong tafsiran kecekapan pelepasan aluminium di bawah keadaan sampel yang berbeza.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

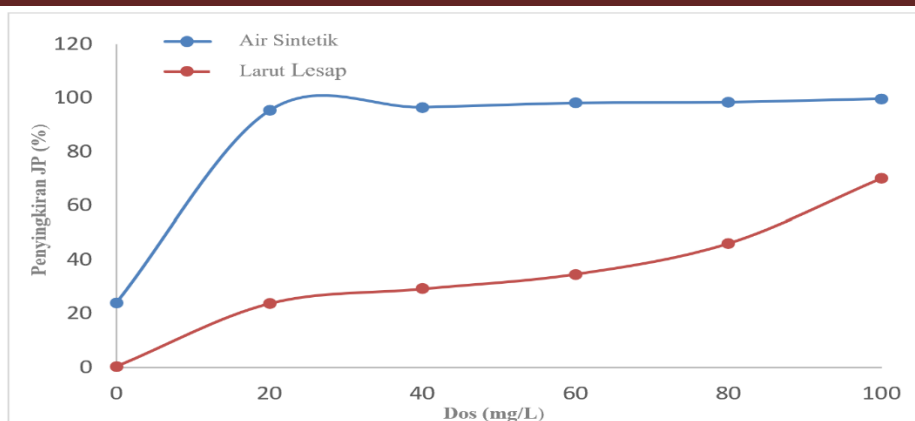
Kesan Beban POK dan JP Terhadap Kecekapan Aluminium Sulfat

Analisis perbandingan kecekapan penyingkiran dalam Rajah 3 dan 4 mendedahkan dua mekanisme penyingkiran yang berbeza namun saling melengkapi. Rajah 3 menunjukkan penyingkiran POK yang tinggi dalam larut resapan (sehingga 73% dengan dos 100 mg/L). Ini menunjukkan berlakunya mekanisme penggumpalan sapan (sweep flocculation) molekul organik kompleks yang berkesan. Trend ini disebabkan oleh beban organik awal larut resapan yang tinggi, yang menggalakkan penyambungan antara zarah dan penggumpalan sapan. Turun naik yang diperhatikan dalam penyingkiran khususnya penurunan pada dos 60 mg/L diikuti dengan peningkatan mendadak pada dos 80 mg/L menunjukkan peralihan antara mekanisme peneutralan cas dan penggumpalan sapan. Sebaliknya, air sintetik (berasaskan Kaolin) kekurangan prekursor organik yang mencukupi untuk membentuk flok yang stabil, mengakibatkan kadar penyingkiran yang tmalar tanpa mengira dos tawas. Kecekapan penyingkiran POK untuk air sintetik kekal jauh lebih rendah (10%–25%). Dalam sistem dengan beban organik yang rendah, kadar pelanggaran yang berkurangan antara spesies koagulan dan molekul organik telah mengehadikan pembentukan flok yang boleh mendap.

Penyingkiran JP yang rendah untuk larut lesap yang diperhatikan dalam Rajah 4, yang mana kadar maksimum hanya mencapai 70% pada dos tertinggi. larut lesap mengandungi kepekatan bahan organik terlarut yang tinggi, yang tercermin dalam POK yang tinggi. Bahan organik ini memerlukan koagulan yang ketara dan menggunakan sebahagian besar cas positif aluminium sulfat melalui peneutralan cas. Akibatnya, koagulan yang tersedia tidak mencukupi untuk menyahstabilkan pepejal terampai, yang membawa kepada pembentukan flok yang lebih lemah. Akibatnya, penyingkiran JP untuk larut lesap adalah jauh lebih rendah daripada air sintetik, yang mengandungi organik terlarut yang minimum dan oleh itu membolehkan penggumpalan yang lebih cekap. Penyingkiran JP bagi air sintetik berasaskan kaolin mencatatkan nilai melebihi 90%. Kecekapan tinggi dalam penyingkiran JP ini digabungkan dengan penyingkiran POK yang rendah (seperti yang dilihat dalam Rajah 3) mengesahkan bahawa dalam air organik rendah/kekeruhan tinggi, fungsi dominan aluminium sulfat adalah peneutralan cas secara langsung. Proses ini berkesan untuk menyahstabilkan zarah kaolin bukan organik tanpa gangguan daripada organik terlarut.



Rajah 3: Kecekapan penyingkiran POK aluminium sulfat sebelum dan selepas rawatan



Rajah 4: Kecekapan penyingkiran JP aluminium sulfat sebelum dan selepas rawatan

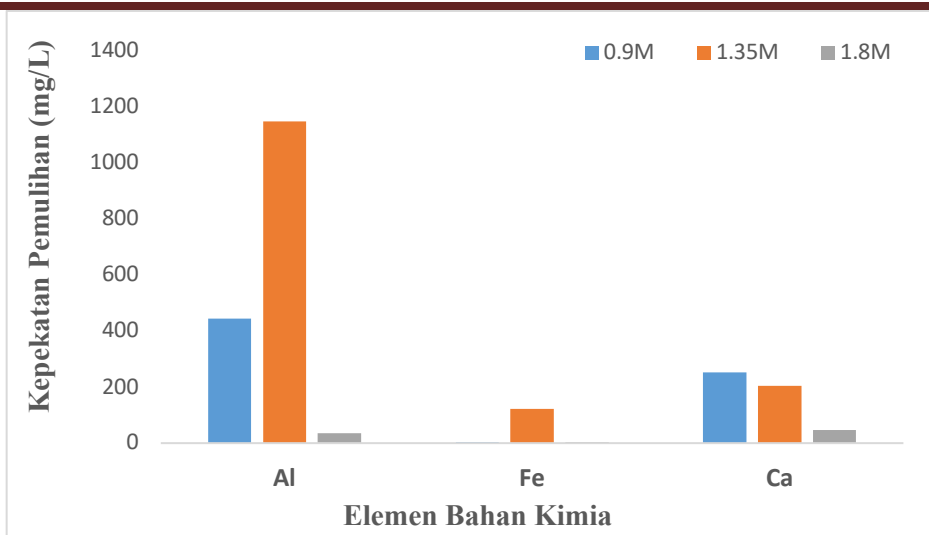
Bagi eksperimen pengasidan untuk mengkaji pemulihan aluminium, sampel enap cemar dikumpul daripada ujian balang yang dilakukan pada dos aluminium sulfat 60 mg/L. Dos ini dipilih kerana kedua-dua sistem larut resap dan air sintetik mempamerkan kecekapan penyingkiran tertinggi bagi POK dan JP di bawah keadaan ini, sekali gus menandakan prestasi koagulasi–flokulasi yang optimum. Penggunaan enap cemar yang terhasil daripada dos ini memastikan bahan yang tertakluk kepada pengasidan mewakili titik rawatan yang paling efektif untuk setiap jenis air. Pendekatan ini menyediakan garis dasar yang konsisten dan setanding untuk menilai kelakuan pelepasan aluminium dan pengekstrakan bersama logam surih yang lain.

Kesan Pengasidan terhadap Pemulihan Aluminium dan Logam Surih

Proses pengasidan menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap perlarutan dan pemulihan aluminium serta logam lain daripada kedua-dua enap cemar yang berasal dari larut resapan dan air sintetik. Keputusan ICP-OES (Rajah 5 dan 6) mendedahkan bahawa kemolaran asid sulfurik megawal secara langsung kelakuan perlarutan Al, Fe dan Ca. Perbezaan yang ketara antara kedua-dua jenis sampel disebabkan oleh matriks kimianya yang berbeza.

Pemulihan Unsur daripada Enap Cemar Larut Lesap

Bagi enap cemar larut resap, pemulihan aluminium meningkat dengan ketara daripada 0.9 M kepada 1.35 M H_2SO_4 . Pada 0.9 M, Al yang diperoleh semula ialah 443.86 mg/L, dan nilai ini meningkat hampir tiga kali ganda kepada 1148.41 mg/L pada 1.35 M. Tren ini menunjukkan perlarutan yang lebih cekap pada kekuatan asid sederhana. Besi (122.70 mg/L) dan kalsium (203.75 mg/L) turut menunjukkan tahap perlarutan tertinggi pada 1.35 M, yang membutuhkan berlakunya perlarutan bersama logam daripada matriks larut lesap yang kompleks. Walau bagaimanapun, peningkatan kepekatan asid kepada 1.8 M menyebabkan penurunan mendadak dalam logam yang diperoleh semula, dengan Al menurun kepada hanya 34.94 mg/L. Ini menunjukkan bahawa asid yang terlalu kuat boleh menggalakkan pemendakan semula atau pembentukan kompleks sulfat tak larut yang mengurangkan kepekatan terlarut yang boleh diukur.



Rajah 5: Pemulihan unsur kimia penting lain daripada larut lesap dengan dos proses pengasidan yang berbeza

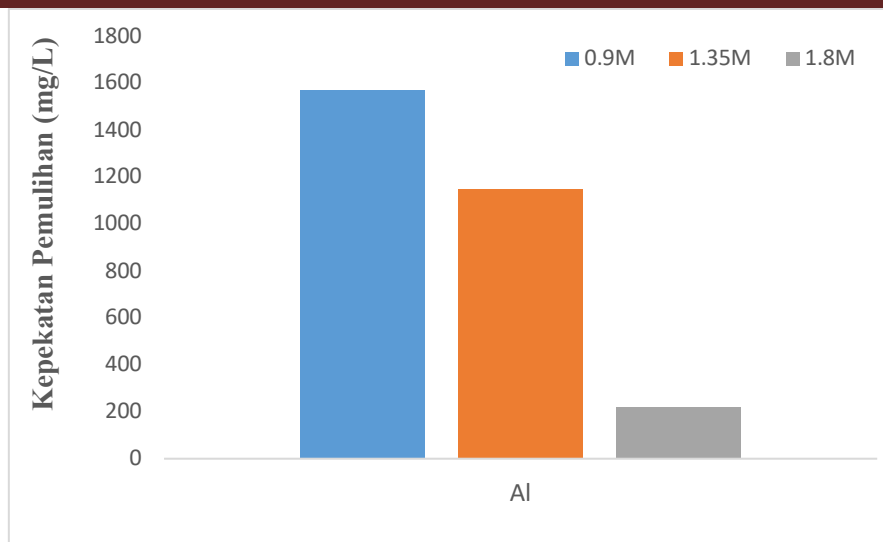
Jadual 1: Kadar pemulihan aluminium untuk larut lesap

Kemolaran H ₂ SO ₄	Kepekatan Awal Aluminium (mg/L)	Kepekatan akhir Aluminium (mg/L)	Kadar Pemulihan (%)
0.9 M	5.2618	449.127	1.17
1.35 M	8.7796	1157.19	0.76
1.8 M	2.0304	36.9671	5.49

Tren ini selaras dengan kajian Basri et al. (2019), yang mengenal pasti 1.35 M H₂SO₄ sebagai keasidan optimum bagi pelarutan aluminium daripada enap cemar berasaskan tawas. Hal ini juga disokong oleh Hamzah et al. (2022), yang melaporkan bahawa kepekatan asid yang lebih tinggi boleh mengurangkan kecekapan pelarutan disebabkan oleh fenomena pemendakan sekunder. Matriks larut resapan, yang mengandungi kandungan bahan organik yang tinggi, bahan humik dan kompleks organik logam, berkemungkinan menyumbang kepada trend keterlarutan yang tidak linear ini. Pengiraan kadar pemulihan (Jadual 1) mengesahkan pemerhatian tersebut. Walaupun kepekatan mutlak aluminium terlarut adalah tertinggi pada 1.35 M, kadar pemulihan kelihatan lebih rendah disebabkan oleh kaedah pengiraan berbanding kepekatan awal. Walau bagaimanapun, trend tersebut jelas menunjukkan bahawa kekuatan asid sederhana menghasilkan pelarutan logam yang paling berkesan, manakala keasidan yang terlalu tinggi mengurangkan proses pengekstrakan.

Pemulihan Aluminium daripada Enap Cemar Air Sintetik

Tidak seperti enap cemar larut lesap, sampel sintetik berasaskan kaolin menunjukkan trend yang berbeza. Aluminium yang diperoleh semula tertinggi dicatatkan pada 0.9 M (1573.03 mg/L), diikuti dengan penurunan sederhana pada 1.35 M (1148.37 mg/L). Pada kepekatan 1.8 M, aluminium terlarut terus menurun kepada 219.68 mg/L. Corak ini menunjukkan bahawa aluminium yang terikat pada zarah kaolin larut paling cekap di bawah pengasidan ringan, dan kepekatan asid yang lebih kuat boleh menyebabkan pemendakan pepejal aluminium sulfat yang cepat, menurunkan kepekatan larut yang diukur.



Rajah 6: Pemulihan aluminium daripada air sintetik dengan dos proses pengasidan yang berbeza

Jadual 2: Kadar pemulihan aluminium untuk air kaolin

Kemolaran H ₂ SO ₄	Kepekatan Awal Aluminium (mg/L)	Kepekatan Akhir Aluminium (mg/L)	Kadar Pemulihan (%)
0.9 M	10.982	1584.01	0.694
1.35 M	322.091	1470.46	21.93
1.8 M	1785.03	1565.35	114.07

Nilai kadar pemulihan (Jadual 2) kelihatan tinggi kerana kepekatan aluminium yang diukur awal dalam enapcemar sintetik adalah rendah, menjadikan peratusannya sensitif secara matematik. Kadar pemulihan untuk dos 1.8 M mencapai 114.07%. Nilai ini, melebihi 100%, menunjukkan bahawa kepekatan asid kuat bukan sahaja memulihkan Tawas yang digunakan semasa pembekuan tetapi juga mula mencerna zarah tanah liat Kaolin (Aluminium Silikat) itu sendiri. Pengekstrakan berlebihan ini menunjukkan potensi 1.8 M H₂SO₄ yang tinggi tetapi juga memberi amaran tentang potensi bendasing dalam tawas yang dipulihkan jika kepekatan asid terlalu tinggi. Walau bagaimanapun, trend berasaskan kepekatan daripada Rajah 6 kekal boleh dipercayai dan menunjukkan bahawa julat pengasidan optimum untuk air sintetik adalah lebih rendah (sekitar 0.9 M), selaras dengan penemuan sebelumnya oleh Zainol et al. (2022), yang melaporkan keterlarutan aluminium yang tinggi daripada kaolin di bawah keadaan berasid lemah hingga sederhana.

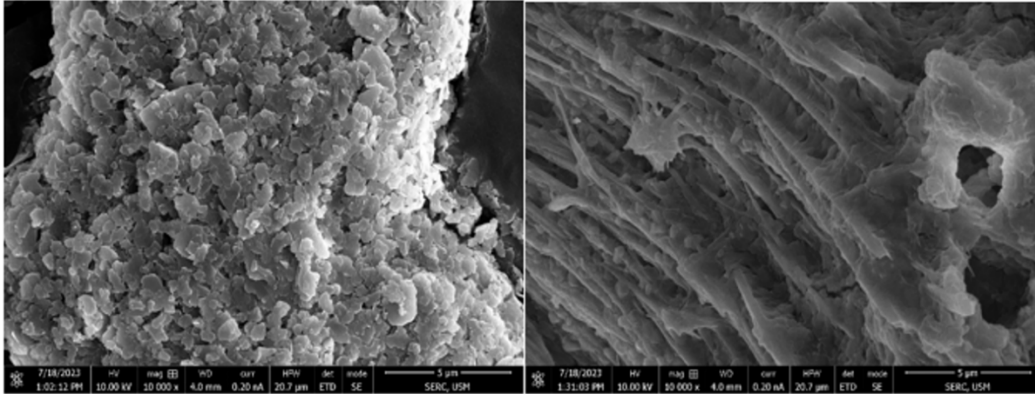
Perbandingan Antara Larut Lesap dan Air Sintetik

Tingkah laku perlarutan yang berbeza antara kedua-dua jenis sampel disebabkan oleh perbezaan komposisi kimianya. Enap cemar larut lesap mengandungi bahan organik, logam kompleks, dan ion bersaing yang meningkatkan permintaan asid sekali gus mewujudkan persaingan antara tindak balas perlarutan dan pemendakan. yang bersaing. Manakala, enap cemar kaolin terdiri terutamanya daripada aluminosilikat, yang bertindak balas secara ramal terhadap pembubaran asid tetapi menjadi kurang larut dalam keadaan berasid yang kuat di mana pemendakan sulfat mendominasi. Kedua-dua sistem mempamerkan tindak balas pengasidan bukan linear, yang mencerminkan keseimbangan antara pembubaran aluminium dan potensi pemendakan semula. Yang penting, logam surih seperti Fe dan Ca juga diperolehi daripada sampel larut lesap, menunjukkan bahawa pengasidan bukan sahaja menggerakkan aluminium tetapi juga unsur-unsur lain yang berkaitan dengan alam sekitar.

Mikroskopi Elektron Imbasan Pancaran Medan (MEIPM)

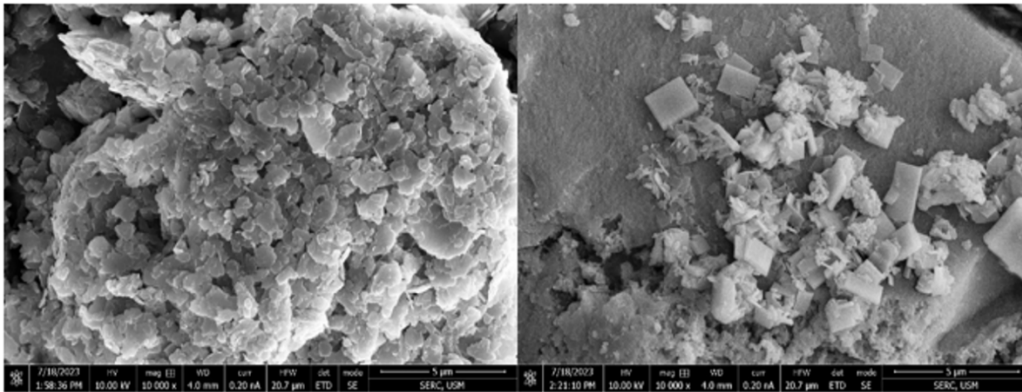
Analisis MEIPM telah dijalankan untuk menggambarkan perubahan morfologi dalam kedua-dua matriks air semasa pembekuan dan pengasidan berikutnya (Rajah 3.5). Enap cemar Kaolin yang diasidkan terlebih dahulu (60 mg/L) mempamerkan bentuk kristal berstruktur, yang berubah di bawah 1.35 M

H_2SO_4 menjadi berkas kristal yang sangat sejajar, memberikan penjelasan visual yang kukuh untuk pemulihan Aluminium yang luar biasa (dan diekstrak secara berlebihan) sebanyak 114%. Sebaliknya, enapcemar larut lesap yang diasidkan terlebih dahulu adalah sangat amorfus, menunjukkan beberapa struktur yang jelas. Pendedahan kepada 1.35 M H_2SO_4 mengurangkan ketumpatan pukal matriks larut lesap dengan ketara, mengesahkan larut lesap logam yang berkesan ke dalam larutan. Walau bagaimanapun, tidak seperti Kaolin, larut lesap tidak membentuk berkas kristal yang teratur, mengesahkan bahawa kompleks bahan organik sisa dengan logam terlarut, sekali gus menghalang penghabluran semula ketulenan tinggi dan mengehadkan kadar pemulihan.



Enap Cemar Larut Lesap pada Pengasidan 1.35 M

Enap Cemar Air Sintetik (Kaolin) pada Pengasidan 1.35 M



Enap Cemar Larut Lesap pada Dos 60 mg/L Aluminium Sulfat

Enap Cemar Air Sintetik (Kaolin) pada Dos 60 mg/L Aluminium Sulfat

Rajah 7: Analisis MEIPM untuk enap cemar larut lesap dan kaolin (Air Sintetik)

KESIMPULAN

Kajian ini berjaya menunjukkan kebolehlaksanaan pemulihan aluminium daripada sisa rawatan menggunakan kaedah pengasidan. Kajian ini juga menyimpulkan bahawa dos tawas optimum untuk penyingkiran bahan pencemar sangat bergantung pada matriks air. Air sintetik mencapai dataran tinggi penyingkiran JP pada 20 mg/L, manakala beban organik larut lesap yang tinggi memerlukan dos 100 mg/L untuk mengatasi kompleksasi organik dan memudahkan penggumpalan sapan. Pemulihan tawas melalui pengasidan menunjukkan bahawa dos 1.35 M H_2SO_4 memberikan pengekstrakan yang paling cekap untuk enapcemar yang berasal dari larut lesap. Menariknya, dalam sisa air sintetik, dos 1.8 M menghasilkan kadar pemulihan melebihi 100% (114.07%), yang, disokong oleh bukti MEIPM, menunjukkan pencernaan serentak zarah tanah liat kaolin. Analisis MEIPM mengesahkan penemuan kimia secara visual, menunjukkan bahawa enapcemar bukan organik daripada air sintetik membolehkan penghabluran semula tawas yang lebih baik berbanding enapcemar larut lesap yang

kaya dengan organik. Kajian ini menekankan bahawa walaupun asid sulfurik merupakan agen pelarutan yang berkesan, ketulen dan kadar pemulihan produk akhir ditentukan oleh komposisi enap cemar awal. Kerja masa hadapan harus tertumpu pada langkah penulenan untuk memisahkan aluminium yang dipulihkan daripada kesan besi dan kalsium yang dikesan dalam sampel larutan bagi memastikan tawas yang dipulihkan memenuhi piawaian penggunaan semula industri.

Rujukan

- American Public Health Association (APHA) (2005), American Water Works Association (AWWA) & Water Environment Federation (WEF). Kaedah Standard bagi Pemeriksaan Air dan Air Sisa (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater) (Edisi ke-21). Washington, DC: American Public Health Association
- Basri, M.H.H., Don, N.N.M., Kasmuri, N., Hamzah, N., Alias, S., & Azizan, F. A. (2019). Pemulihan aluminium daripada enap cemar rawatan air di bawah dos asid sulfurik yang berbeza (Aluminium recovery from water treatment sludge under different dosage of sulphuric acid). *Journal of Physics: Conference Series*, 1349(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1349/1/012005>
- Boaventura, R.A.R., Duarte, A.A.S. & Almeida, M.F. (2000). Pemulihan aluminium daripada enap cemar rawatan air (Aluminum recovery from water treatment sludges). IV International Conference, Water Supply and Water Quality, Kraków, Poland, 11-13 September 2000.
- Hamzah, N., Roshisham, M.A.F., Zakaria, M.F., Basri, M.H.H., Akbar, N.A. (2022). Prestasi Koagulan yang Dipulihkan daripada Enap Cemar Rawatan Air melalui Proses Pengasidan (Performance of Recovered Coagulant from Water Treatment Sludge by Acidification Process). *Environment and Ecology Research*, Jil. 10, No. 1, ms. 21 - 30, 2022. DOI: 10.13189/eer.2022.100103.
- Igwegbe, C.A., López-Maldonado, E.A., Landázuri, A.C., Ovuoraye, P.E., Ogbu, A.I., Vela-García, N., Białowiec, A. (2024). Pengurusan lindungan tapak pelupusan perbandaran yang mampan: Amalan semasa, cabaran, dan hala tuju masa hadapan (Sustainable municipal landfill leachate management: Current practices, challenges, and future directions). *Desalination and Water Treatment*, 320, 100709. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100709>.
- Mora-León, A.G., Castro-Jiménez, C.C., Saldarriaga-Molina, J.C., Edwin, F., Garcia A., Correa-Ochoa M.A. (2022). Koagulan aluminium yang dipulihkan daripada enap cemar rawatan air sebagai alternatif untuk menambah baik rawatan primer air sisa domestik (Aluminium recovered coagulant from water treatment sludge as an alternative for improving the primary treatment of domestic wastewater). *Journal of Cleaner Production* 346, 131229. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131229>.
- Shawal, N.B.M., Razali N.A., Hairom, H.H., Yatim, N.I.I., Rasit, N., Harun, M.H.C., Kasan, N., Hamzah, S. (2023). Kajian parametrik pemulihan koagulan daripada enap cemar rawatan air ke arah ekonomi kitaran air (Parametric study of coagulant recovery from water treatment sludge towards water circular economy). *Water Sci Technol.*, 15 Disember 2023; 88 (12): 3142–3150. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.398>.