From Waste to Resources: Rekayasa Proses Sirkular untuk Pemulihan Material dan Pengolahan Air Berkelanjutan

Agus Mirwan

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru, Kalimantan Selatan, Indonesia

e-mail: agusmirwan@ulm.ac.id

ABSTRACT

Industrial downstreaming increases product value but may simultaneously intensify water, energy, chemical, and material consumption and generate wastewater and solid residues. This article synthesizes a series of studies on circular process engineering developed from local resources and industrial residues in South Kalimantan, with emphasis on aluminum and silica recovery and electrocoagulation-based water treatment. Water treatment sludge showed aluminum leaching efficiencies increasing from approximately 72% to 80% as HCl concentration increased from 1 to 4 M. Peat clay contained substantial SiO_2 and Al_2O_3 and was further investigated using conventional and microwave-assisted leaching; aluminum recovery reached 91.27% at 90 °C for 60 min in conventional leaching, while microwave intensification shortened extraction time under selected conditions. Electrocoagulation achieved high removal of color and TOC from peat water, BOD/COD/TSS from POME, and color, turbidity, TSS, COD, and BOD5 from Sasirangan wastewater. The synthesis indicates that sustainable implementation requires integration of resource recovery, process intensification, water reuse, energy efficiency, techno-economic analysis, life-cycle assessment, and scale-up toward circular industrial systems.

Keywords: circular process engineering, electrocoagulation, process intensification, resource recovery, water treatment.

ABSTRAK

Hilirisasi industri meningkatkan nilai tambah produk, tetapi pada saat yang sama dapat meningkatkan konsumsi air, energi, bahan kimia, dan material serta menghasilkan air limbah dan residu padat. Artikel ini menyintesis rangkaian hasil penelitian mengenai rekayasa proses sirkular berbasis sumber daya lokal dan residu industri di Kalimantan Selatan, dengan fokus pada pemulihan aluminium (Al) dan silika serta pengolahan air berbasis elektrokoagulasi. Pada lumpur pengolahan air, efisiensi *leaching* Al meningkat dari sekitar 72% menjadi 80% ketika konsentrasi HCl dinaikkan dari 1 menjadi 4 M. Tanah lempung gambut mengandung SiO_2 dan Al_2O_3 dalam jumlah signifikan dan selanjutnya dikaji melalui *leaching* konvensional serta *microwave-assisted leaching*; *recovery* Al mencapai 91,27% pada 90 °C selama 60 menit pada leaching konvensional, sedangkan intensifikasi microwave memungkinkan waktu ekstraksi yang lebih singkat pada kondisi tertentu. Elektrokoagulasi memberikan removal tinggi pada air gambut, POME, dan limbah Sasirangan. Sintesis menunjukkan bahwa implementasi berkelanjutan memerlukan integrasi *resource recovery*, *process intensification*, *water reuse*, efisiensi energi, analisis tekno-ekonomi, *life-cycle assessment*, dan *scale-up* menuju sistem industri sirkular.

Kata kunci: elektrokoagulasi, intensifikasi proses, pemulihan sumber daya, rekayasa proses sirkular, pengolahan air.

PENDAHULUAN

Hilirisasi industri merupakan instrumen strategis untuk meningkatkan nilai tambah sumber daya melalui pengolahan menjadi produk dengan fungsi dan nilai ekonomi yang lebih tinggi. Namun, keberhasilan hilirisasi tidak cukup dinilai dari peningkatan kapasitas produksi dan nilai ekonomi produk. Intensifikasi aktivitas industri juga meningkatkan kebutuhan air, energi, bahan kimia, dan bahan baku, sekaligus menghasilkan air limbah, emisi, dan residu padat. Dalam kondisi tersebut, pendekatan linier *raw material-process-product-waste-disposal* berpotensi memindahkan tekanan lingkungan dari tahap ekstraksi sumber daya menuju tahap pengolahan dan pembuangan.

Teknik Kimia menyediakan kerangka konseptual untuk menggeser pengelolaan lingkungan dari pollution control menuju *resource recovery* dan *circular process engineering*. Pergeseran ini tidak meniadakan fungsi pengolahan limbah, tetapi memperluas tujuan proses dari sekadar memenuhi baku mutu menjadi pemulihan material, pengurangan intensitas sumber daya, dan pemanfaatan kembali air atau material di dalam sistem produktif. Prinsip tersebut relevan dengan water-waste-material nexus, karena air, bahan baku, energi, dan limbah saling berinteraksi dalam satu sistem proses.

Rangkaian penelitian yang dikembangkan di Kalimantan Selatan menunjukkan peluang integrasi antara pemulihan material dan pengolahan air. Tanah lempung gambut memiliki kandungan mineral aluminosilikat yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber alternatif Al dan silika (Si) [1]-[3]. Lumpur pengolahan air juga mengandung Al yang dapat dipulihkan melalui leaching asam dan dijelaskan melalui pendekatan kinetika serta perpindahan massa [4]. Pada

sisi lain, elektrokoagulasi telah diaplikasikan untuk matriks air yang berbeda, antara lain air gambut [8], *palm oil mill effluent* (POME) [9], serta air limbah Sasirangan [10], [11].

Artikel ini bertujuan menyintesis hasil-hasil tersebut ke dalam satu kerangka rekayasa proses sirkular dan mengidentifikasi implikasinya terhadap hilirisasi industri berkelanjutan. Fokus pembahasan mencakup: (i) karakterisasi dan pemulihan Al-Si dari sumber daya lokal dan residu; (ii) intensifikasi proses melalui *microwave-assisted leaching*; (iii) elektrokoagulasi untuk pengolahan air dan air limbah; serta (iv) kebutuhan optimasi, evaluasi keberlanjutan, dan *scale-up* menuju implementasi industri.

TINJAUAN PUSTAKA

Resource Recovery dan *Circular Process Engineering*

Resource recovery menempatkan limbah dan residu sebagai sumber daya sekunder yang masih mengandung komponen bernilai. Dalam sistem pengolahan air, misalnya, koagulan berbasis Al yang telah digunakan dapat terakumulasi pada lumpur. Apabila Al tersebut dapat dipulihkan, konfigurasi sistem dapat bergeser dari sludge-disposal menuju *sludge-recovery-secondary material*. Konsep yang sama berlaku pada sumber daya mineral lokal, ketika material bernilai rendah dapat diproses menjadi prekursor atau bahan fungsional.

Karakterisasi *peat clay* dari Kalimantan Selatan menunjukkan dominasi SiO_2, Al_2O_3, dan Fe_2O_3. Salah satu studi melaporkan peningkatan komposisi SiO_2 dari 18,0% menjadi 31,9% dan Al_2O_3 dari 7,2% menjadi 17,9% setelah kalsinasi 700 °C selama 2 jam [1]. Temuan tersebut mendukung potensi *peat clay* sebagai sumber adsorben, katalis, atau bahan baku koagulan, sekaligus memberikan dasar untuk pengembangan proses *leaching*.

Leaching, Kinetika, dan Intensifikasi Proses

Leaching merupakan operasi perpindahan massa padat-cair yang memindahkan komponen terlarut dari matriks padatan ke fase cair. Kinerja leaching dipengaruhi oleh konsentrasi pelarut, ukuran partikel, temperatur, waktu kontak, pengadukan, struktur padatan, serta mekanisme pengendali laju. Kajian terhadap water treatment sludge menunjukkan bahwa kenaikan konsentrasi HCl dari 1 menjadi 4 M meningkatkan efisiensi leaching Al dari sekitar 72% menjadi 80%; ukuran partikel yang lebih kecil dan temperatur yang lebih tinggi juga meningkatkan recovery [4]. Model kinetika menunjukkan mekanisme dua tahap: difusi melalui lapisan produk pada tahap awal dan kontrol reaksi kimia pada tahap berikutnya, dengan energi aktivasi masing-masing 9,58 dan 10,73 kJ/mol [4].

Pada *peat clay*, *leaching* Al menggunakan 4 M HCl menghasilkan *recovery* maksimum 91,27% pada 90 °C dan 60 menit [3]. Penggunaan *microwave* dikembangkan untuk mempercepat interaksi energi-material. Pada 4 M HCl dan 40 °C selama 15 menit, recovery Al sekitar 46,6% pada 80 W meningkat menjadi 67% pada 100 W [2]. Kajian lanjutan menunjukkan bahwa optimasi *microwave* tidak hanya berkaitan dengan *recovery*, tetapi juga dengan keseimbangan antara reaksi, difusi, konsumsi reagen, dan intensitas energi [6]. Untuk Si, *microwave-assisted alkaline leaching* menggunakan NaOH menghasilkan silikat aktual sekitar 30,62% berat pada daya 900 W dan 15 menit [5].

Elektrokoagulasi sebagai Platform Pengolahan Air

Elektrokoagulasi mengintegrasikan reaksi elektrokimia, koagulasi, adsorpsi, sedimentasi, dan flotasi. Pada elektroda Al, pelarutan anoda menghasilkan Al^{3+} yang selanjutnya terhidrolisis membentuk spesies hidroksi Al termasuk $Al(OH)_3$ sebagai koagulan in situ. Pada katoda, reduksi air menghasilkan H_2 dan OH^-, sehingga gelembung hidrogen dapat membantu pemisahan flok melalui elektroflotasi. Keunggulan utama pendekatan ini adalah pengurangan kebutuhan penambahan koagulan eksternal, walaupun konsumsi energi, pelarutan elektroda, pembentukan lumpur, dan kualitas efluen tetap perlu dievaluasi secara menyeluruh [10]-[12].

Karena karakter matriks air berbeda, kondisi operasi tidak dapat diseragamkan. Air gambut kaya *natural organic matter*; POME memiliki beban organik dan padatan yang tinggi; sedangkan air limbah Sasirangan mengandung warna, kekeruhan, padatan, dan komponen organik dari proses tekstil. Oleh sebab itu, pemilihan *current density*, waktu reaksi, jarak elektroda, dan konfigurasi reaktor perlu disesuaikan dengan karakter pencemar dan tujuan akhir penggunaan air.

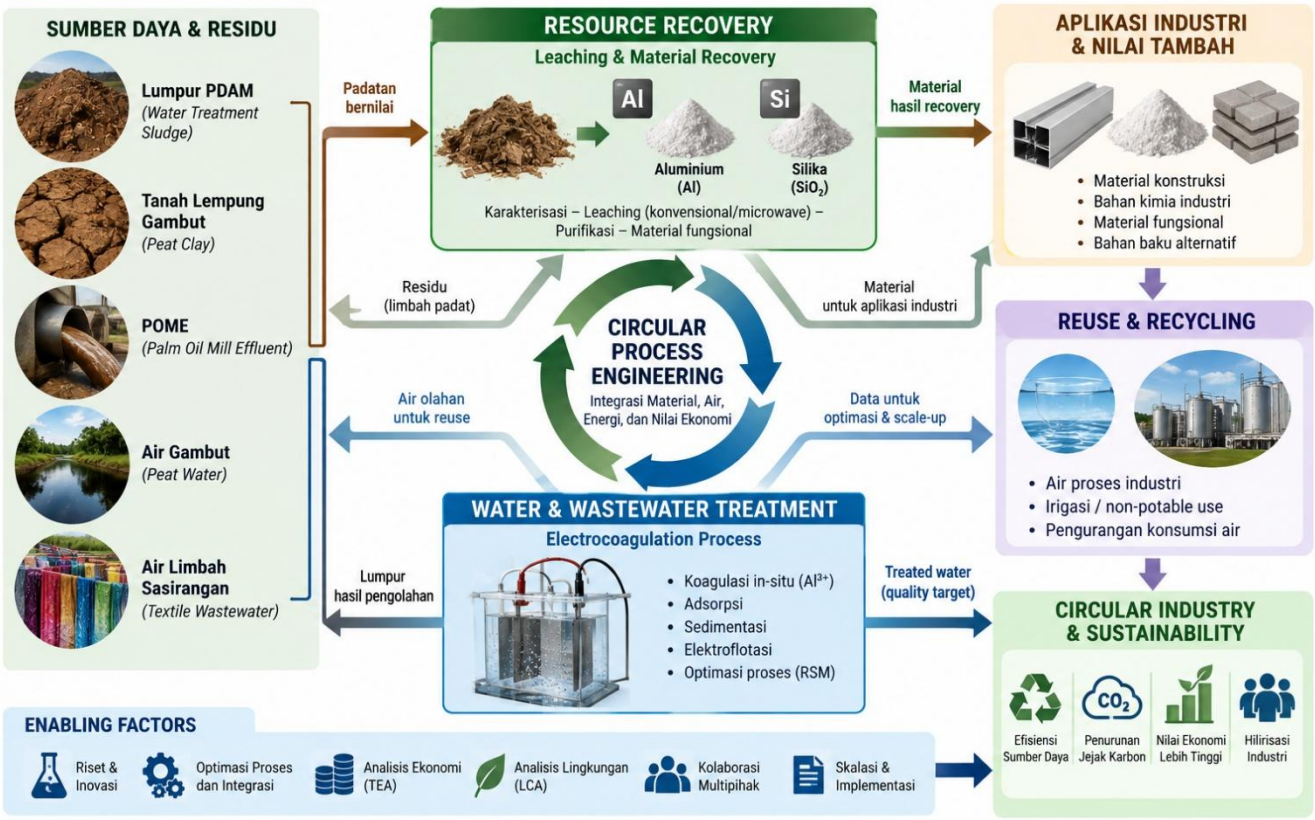
METODE

Artikel ini merupakan sintesis integratif terhadap rangkaian penelitian penulis dan tim yang telah dipublikasikan pada periode 2019-2025. Sumber utama mencakup karakterisasi *peat clay* [1], *microwave-assisted leaching* Al [2], kinetika *leaching* Al dari *peat clay* [3], *leaching* Al dari water treatment sludge [4], *microwave-assisted leaching* Si [5], pemodelan *leaching* berbantuan *microwave* [6], elektrokoagulasi POME [9], elektrokoagulasi air limbah Sasirangan [10], [11], serta optimasi elektrokoagulasi air gambut menggunakan RSM-CCD [8].

Sintesis dilakukan melalui empat tahap. Pertama, data eksperimental utama dikelompokkan ke dalam dua jalur, yaitu *resource recovery* dan *water/wastewater treatment*. Kedua, variabel proses dan indikator kinerja utama dibandingkan

untuk mengidentifikasi hubungan antara intensifikasi proses, *recovery* atau *removal*, dan penggunaan sumber daya. Ketiga, hasil-hasil tersebut dipetakan ke dalam kerangka *circular process engineering* untuk menilai peluang *reuse*, pemanfaatan material sekunder, dan industrial symbiosis. Keempat, kebutuhan pengembangan menuju implementasi industri dianalisis secara konseptual melalui tahapan *process optimization*, *product/process validation*, *continuous prototype*, *techno-economic analysis* (TEA), *life-cycle assessment* (LCA), *pilot scale*, dan *industrial demonstration*.

Kerangka integrasi yang digunakan dalam sintesis ditunjukkan pada Gambar 1. Hubungan antar hasil penelitian diperlakukan sebagai kerangka konseptual; penggunaan langsung produk *recovery* sebagai koagulan atau material fungsional tidak dinyatakan telah terbukti kecuali didukung oleh hasil eksperimen yang telah dipublikasikan.



Gambar 1. Kerangka integrasi resource recovery, pengolahan air, dan circular process engineering.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemulihan Al dan Si dari Sumber Daya Lokal dan Residu

Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa sumber daya lokal dan residu pengolahan air memiliki dasar kimia yang memadai untuk dikembangkan sebagai sumber sekunder. *Peat clay* mengandung mineral utama SiO_2, Al_2O_3, dan Fe_2O_3; kalsinasi meningkatkan fraksi relatif SiO_2 dan Al_2O_3 akibat hilangnya komponen volatil dan transformasi struktur mineral [1]. Pada komposisi yang berbeda, penelitian lain melaporkan sekitar 30,4% SiO_2, 21,7% Al_2O_3, dan 18,3% Fe_2O_3 [5]. Variasi ini menegaskan bahwa karakterisasi awal merupakan tahap fundamental sebelum merancang ekstraksi selektif.

Pada *water treatment sludge*, peningkatan konsentrasi HCl dari 1 M ke 4 M meningkatkan *leaching* Al dari sekitar 72% menjadi 80% [4]. Secara rekayasa, hubungan ini menunjukkan bahwa *driving force* kimia berperan penting, tetapi peningkatan konsentrasi asam harus dipertimbangkan bersama konsumsi *reagen*, korosi, kebutuhan netralisasi, dan kualitas produk *recovery*. Temuan kinetika dua tahap juga menunjukkan bahwa *scale-up* tidak dapat hanya menggunakan data *equilibrium*; mekanisme difusi dan reaksi perlu dipertimbangkan dalam pemilihan waktu tinggal dan konfigurasi reaktor.

Pada *peat clay*, *recovery* Al sebesar 91,27% pada 90 °C dan 60 menit menunjukkan bahwa temperatur sangat berpengaruh terhadap laju ekstraksi [3]. Intensifikasi menggunakan *microwave* memperpendek waktu pengolahan pada kondisi tertentu. Pada 4 M HCl dan 40 °C selama 15 menit, *recovery* meningkat dari 46,6% pada 80 W menjadi 67%

pada 100 W [2]. Studi pemodelan lanjutan menunjukkan bahwa peningkatan daya mempercepat reaksi, tetapi juga mengubah kontribusi hambatan difusi; dengan demikian, *microwave* tidak boleh diperlakukan semata-mata sebagai sumber panas yang lebih kuat, melainkan sebagai variabel proses yang memengaruhi mekanisme transfer massa dan reaksi [6].

Kinerja Elektrokoagulasi pada Matriks Air yang Berbeda

Tabel 1 merangkum kinerja utama yang diperoleh pada tiga matriks air. Perbandingan tersebut memperlihatkan bahwa current density dan waktu reaksi harus diinterpretasikan terhadap karakteristik pencemar, bukan sebagai parameter universal yang dapat diterapkan identik untuk semua sistem.

Tabel 1. Sintesis kinerja elektrokoagulasi pada matriks air yang berbeda.

Matriks	Variabel utama	Kondisi/ruang uji	Kinerja utama	Implikasi
Air gambut	Rapat arus, waktu	6-14 mA/cm²; 30-90 menit	Warna 98,1%; TOC 91% pada eksperimen terbaik; optimum gabungan 6,140 mA/cm² dan 76,042 menit	Optimasi multi-respons lebih relevan daripada sekadar removal maksimum [8]
POME	Rapat arus, waktu	2-10 mA/cm²; hingga 270 menit	BOD hingga 99%; COD sekitar 78%; TSS sekitar 93%	Rapat arus kunci, tetapi arus lebih tinggi tidak selalu paling efisien [9]
Limbah Sasirangan	Rapat arus, waktu, jarak elektroda	5,5 mA/cm²; 15 menit; 2 cm	Warna 89,5%; kekeruhan 87,1%; TSS 71,9%; COD 59,60%; BOD5 62,47%	Limbah Al6061-T6 dapat dimanfaatkan sebagai elektroda; treated water berpotensi untuk reuse [10], [11]

Pada air gambut, penggunaan *Response Surface Methodology - Central Composite Design* (RSM-CCD) menghasilkan dua lapisan informasi. Pertama, eksperimen menunjukkan removal warna maksimum 98,1% dan *total organic carbon* (TOC) sekitar 91% pada titik eksperimen terbaik. Kedua, optimasi multi-respons memberikan kondisi optimum 6,140 mA/cm² dan 76,042 menit; pada validasi kondisi optimum, *removal* warna sekitar 85,185% dan TOC 90,464% [8]. Perbedaan antara maksimum eksperimental dan kondisi optimum menegaskan bahwa optimasi bertujuan memperoleh kombinasi respons yang paling rasional, bukan mempertahankan satu respons pada nilai ekstrem.

Pada POME, kinerja tinggi diperoleh pada kisaran rapat arus 4-6 mA/cm², dengan *removal biochemical oxygen demand* (BOD) hingga sekitar 99%, *chemical oxygen demand* (COD) sekitar 78%, dan *total suspended solids* (TSS) sekitar 93% pada 270 menit [9]. Rapat arus menentukan laju pelepasan ion logam dan pembentukan koagulan, tetapi arus yang terlalu tinggi dapat meningkatkan konsumsi energi, mempercepat pelarutan elektroda, serta mendorong overdosis koagulan. Karena itu, penentuan kondisi operasi perlu memasukkan indikator specific energy consumption dan electrode consumption pada studi lanjutan.

Studi air limbah Sasirangan memperlihatkan peluang *industrial symbiosis*. *Scrap* Al dari industri furnitur tipe Al6061-T6 digunakan sebagai elektroda. Pada 15 menit, 5,5 mA/cm², dan jarak elektroda 2 cm, removal warna, kekeruhan, dan TSS berturut-turut mencapai 89,5%, 87,1%, dan 71,9% [10]. Pada kondisi yang sama, studi lanjutan menunjukkan penurunan COD 59,60% dan BOD 62,47% [11]. Selain itu, *treated water* menunjukkan potensi untuk digunakan kembali pada proses produksi Sasirangan [10]. Pola ini membentuk rantai industrial *waste-electrode-wastewater treatment-water reuse*.

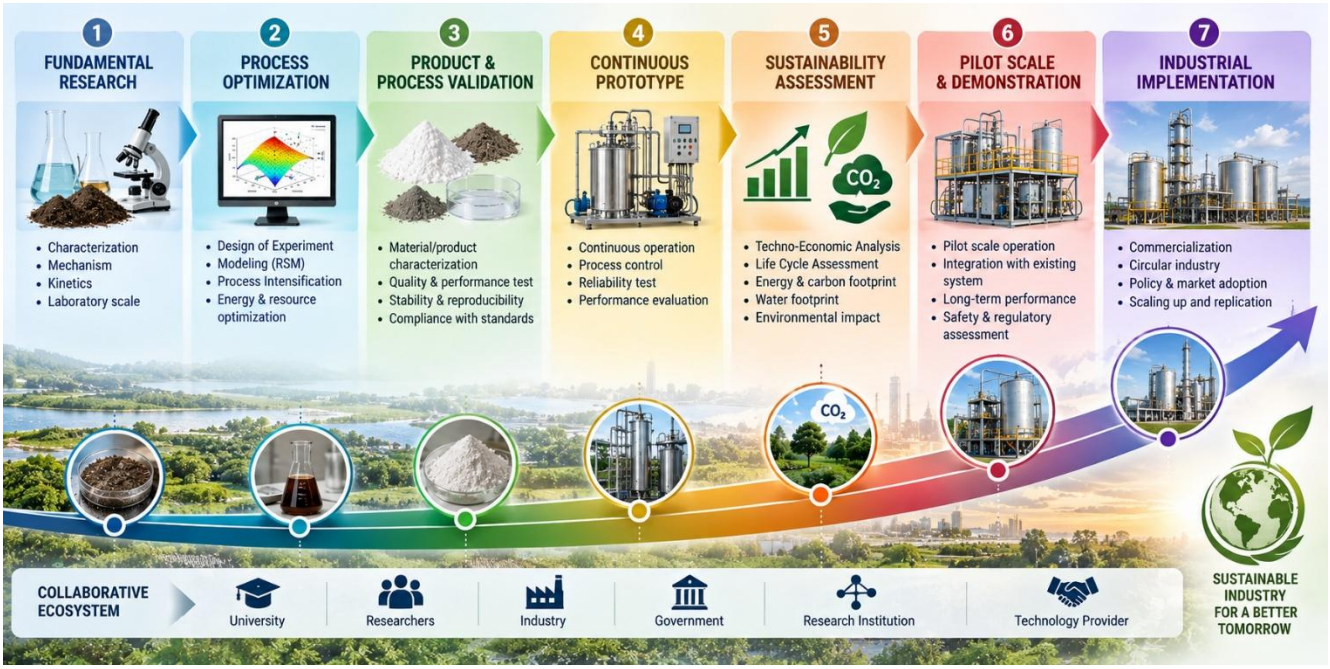
Integrasi Circularity, Transisi Energi, dan Kesiapan Hilirisasi

Hasil-hasil tersebut dapat ditempatkan dalam satu kerangka: *local resources/industrial residues-characterization-resource recovery-functional material* or Al/Si-*rich streams-water and wastewater treatment-treated water-reuse*. Namun, tingkat bukti pada setiap mata rantai tidak sama. Pemulihan Al dari *water treatment sludge* (WTS) telah terbukti secara eksperimental [4], sedangkan transformasi produk *recovery* tersebut menjadi koagulan atau material fungsional yang digunakan kembali secara penuh masih memerlukan purifikasi, sintesis, karakterisasi, uji keamanan, dan validasi performa. Pemisahan antara bukti yang telah tersedia dan roadmap berikutnya penting untuk menjaga integritas ilmiah konsep *circularity*.

Elektrokoagulasi dan *microwave-assisted leaching* sama-sama menggunakan energi listrik, sehingga memiliki peluang integrasi dengan sumber energi rendah karbon. Meskipun demikian, elektrifikasi tidak otomatis identik dengan keberlanjutan. Evaluasi harus memasukkan *specific energy consumption*, *electrode consumption*, *chemical consumption*, *carbon intensity*, *recovery/removal efficiency*, serta mutu produk atau efluen. Dengan demikian, *removal efficiency* perlu ditempatkan sebagai salah satu indikator, bukan satu-satunya indikator.

Untuk hilirisasi, *technology readiness* perlu dibangun secara bertahap melalui *fundamental research*, *process optimization, product/process validation, continuous prototype, sustainability assessment, pilot scale*, dan *industrial demonstration*. Gambar 2 menunjukkan bahwa pengembangan teknologi bukan sekadar peningkatan ukuran reaktor, tetapi jembatan antara *scientific readiness, technological readiness, economic readiness*, dan *industrial readiness*. Pada

tahap tersebut, TEA dan LCA menjadi instrumen penting untuk menilai apakah teknologi yang efektif di laboratorium juga layak secara ekonomi dan memberikan manfaat lingkungan pada skala nyata.



Gambar 2. Roadmap pengembangan dari bukti ilmiah menuju implementasi industri.

KESIMPULAN

Rangkaian penelitian menunjukkan bahwa sumber daya lokal, residu pengolahan air, dan air limbah dapat diposisikan dalam satu kerangka *circular process engineering*. *Peat clay* memiliki kandungan Al-Si yang signifikan dan dapat diekstraksi melalui leaching konvensional maupun *microwave-assisted leaching*; WTS juga menunjukkan potensi sebagai sumber sekunder Al dengan efisiensi *leaching* sekitar 72-80% pada variasi HCl 1-4 M. Elektrokoagulasi efektif diterapkan pada air gambut, POME, dan limbah Sasirangan, tetapi kondisi optimum berbeda karena karakter matriks air dan target pengolahan berbeda. Hasil penelitian menegaskan bahwa *removal* atau *recovery* maksimum tidak cukup digunakan sebagai satu-satunya ukuran keberhasilan. Implementasi industri memerlukan optimasi multi-parameter, evaluasi energi dan material, pengelolaan residu sekunder, TEA, LCA, validasi produk, sistem kontinu, *pilot scale*, dan *industrial demonstration*. Dengan pendekatan tersebut, arah hilirisasi dapat bergerak dari model *take-make-use-dispose* menuju *recover-reengineer-reuse-regenerate* yang lebih efisien, sirkular, dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Universitas Lambung Mangkurat, para mahasiswa dan kolaborator penelitian, serta seluruh mitra yang berkontribusi dalam pengembangan kajian pemulihan sumber daya dan pengolahan air. Apresiasi juga disampaikan kepada panitia Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan VI (SENASTITAN VI) atas kesempatan menyampaikan gagasan dan sintesis hasil penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. Mirwan, M. D. Putra, and R. A. Lestari, “Potential Peat Clay for Minerals Source Utilized as Adsorbent and Catalyst,” MATEC Web Conf., vol. 280, p. 04003, 2019, doi: 10.1051/matecconf/201928004003.

[2] A. Mirwan, M. D. Putra, R. A. Lestari, M. R. Haka, and M. B. Ulum, “Effect of acid concentration on the aluminum leaching process,” IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 524, p. 012010, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/524/1/012010.

[3] A. Mirwan, S. Susianto, A. Altway, and R. Handogo, “Temperature-dependent kinetics of aluminum leaching from peat clay,” Malaysian J. Fundam. Appl. Sci., vol. 16, no. 2, pp. 248-251, 2020.

[4] A. Mirwan, M. D. Putra, J.-C. Liu, Susianto, A. Altway, and R. Handogo, “Aluminum leaching from water treatment sludge using hydrochloric acid and kinetic study,” Environ. Sci. Pollut. Res., vol. 27, pp. 25553-25562, 2020, doi: 10.1007/s11356-020-08922-x.

[5] N. Hidayati et al., “Influence of microwave power and temperature on the silica leaching process,” IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., vol. 1053, p. 012117, 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1053/1/012117.

[6] Hairullah et al., "A modified shrinking core model for microwave-assisted leaching of aluminum from peat clay," IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., vol. 1212, p. 012018, 2022, doi: 10.1088/1757-899X/1212/1/012018.

[7] A. Mirwan et al., "Insight into aluminum leaching with microwave from peat clay: A comparative kinetic study of SC and BIC models," Commun. Sci. Technol., vol. 10, no. 2, pp. 447-459, 2025, doi: 10.21924/cst.10.2.2025.1850.

[8] S. M. Dessy, A. Mirwan, D. R. Wicakso, B. F. P. Suherman, and S. Nurhalisa, "Color and Total Organic Carbon (TOC) Removal from Peat Water Using The Electrocoagulation Process: Central Composite Design for Optimization," J. Sains Mater. Indones., vol. 26, no. 2, pp. 165-172, 2025, doi: 10.55981/jsmi.9027.

[9] P. C. Ulfa, A. Mirwan, D. R. Wicakso, Sahrani, A. F. Azwari, L. H. Lestari, and N. Maliyah, "Influence of Current Density for Pollutant Removal from Palm Oil Mill Effluent," Adv. Sci. Technol., vol. 138, pp. 105-111, 2024.

[10] A. P. Paramita, A. Mirwan, R. Mu'minah, A. Purnawilda, and C. Irawan, "Performance of Electrocoagulation Process for Batik-Modified Sasirangan Textiles Wastewater using Aluminum Electrode Waste from Furniture Industry (Al6061-T6 Type)," AIP Conf. Proc., 2023.

[11] A. P. Paramita, A. Mirwan, R. Mu'minah, A. Purnawilda, and C. Irawan, "Treatment of Chemical and Biological Oxygen Demand on Batik-Modified Sasirangan Textile Wastewater using Electrocoagulation Process," Dinamika Kerajinan dan Batik, vol. 40, no. 2, pp. 135-148, 2023, doi: 10.22322/dkb.v40i1.7695.g6189.

[12] S. Garcia-Segura, M. M. S. Eiband, J. V. de Melo, and C. A. Martínez-Huitle, "Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies," J. Electroanal. Chem., vol. 801, pp. 267-299, 2017, doi: 10.1016/j.jelechem.2017.07.047.