

Peningkatan penggunaan kendaraan listrik dan sistem penyimpanan energi berbasis baterai lithium-ion dalam beberapa tahun terakhir telah mendorong kenaikan permintaan litium secara signifikan. Di sisi lain, keterbatasan sumber daya litium primer serta dampak lingkungan dari aktivitas penambangan menjadikan pengembangan teknologi daur ulang baterai sebagai isu strategis dalam mendukung keberlanjutan dan keamanan pasokan material kritis. Baterai lithium-ion berbasis nikel-mangan-kobalt (NMC) merupakan salah satu jenis baterai yang paling banyak digunakan, sehingga limbahnya berpotensi menjadi sumber sekunder litium yang bernilai apabila dapat diproses secara efektif.

Larutan hasil pelindian (water leaching) black mass baterai NMC memiliki karakteristik multikomponen dengan keberadaan ion Li^+ bersama ion logam transisi Ni^{2+} , Mn^{2+} , dan Co^{2+} . Kompleksitas komposisi ini menjadi tantangan utama dalam pemisahan selektif litium, karena metode konvensional berbasis presipitasi atau ekstraksi pelarut umumnya membutuhkan konsumsi bahan kimia tinggi serta menghasilkan limbah sekunder. Oleh karena itu, pendekatan pemisahan berbasis membran, khususnya electro-nanofiltration (ENF), menjadi alternatif yang menarik karena mengombinasikan gaya dorong tekanan dan medan listrik untuk meningkatkan selektivitas pemisahan ion.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja pemisahan litium dari larutan hasil pelindian air black mass NMC menggunakan sistem ENF dengan membran nanofiltrasi NF5. Variasi kondisi operasi yang dikaji meliputi tekanan operasi sebesar 2, 4, dan 6 bar serta tegangan listrik 0, 2, 4, dan 6 V. Karakterisasi membran dilakukan menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi penyusun membran yang berperan dalam mekanisme eksklusi muatan. Kinerja proses dianalisis berdasarkan fluks permeat, fluks ion litium, rejeksi ion, selektivitas pemisahan Li terhadap ion logam transisi, serta perubahan pH larutan selama proses.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan medan listrik secara signifikan memengaruhi perilaku transport ion dalam sistem ENF. Peningkatan tegangan listrik menyebabkan penurunan rejeksi Li^+ hingga bernilai sangat rendah bahkan negatif pada kondisi tertentu, yang mengindikasikan terjadinya permeasi selektif litium ke sisi permeat akibat kontribusi mekanisme elektromigrasi. Sebaliknya, ion divalen Ni^{2+} , Mn^{2+} , dan Co^{2+} menunjukkan rejeksi yang sangat tinggi pada tekanan rendah hingga menengah, yang dikaitkan dengan kombinasi eksklusi muatan (Donnan exclusion) dan hambatan sterik akibat jari-jari hidrasi serta energi hidrasi yang lebih besar. Pada tekanan tinggi, peningkatan fluks pelarut menyebabkan dominasi mekanisme konvektif sehingga selektivitas pemisahan cenderung menurun.

Berdasarkan evaluasi menyeluruh terhadap rejeksi ion, fluks permeat, fluks ion litium, dan kestabilan operasi, kondisi optimum proses ENF diperoleh pada tekanan 2 bar dan tegangan 6 V. Kondisi ini memberikan selektivitas litium terhadap NMC tertinggi, rejeksi ion Ni^{2+} , Mn^{2+} , dan Co^{2+} di atas 99,99%, fluks permeat serta fluks ion litium tertinggi dan stabil. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa electro-nanofiltration berpotensi menjadi teknologi pemisahan yang efektif dan ramah lingkungan untuk pemulihan litium dari larutan hasil pelindian black mass baterai NMC, serta dapat menjadi dasar pengembangan lebih lanjut menuju aplikasi skala industri.

Kata kunci: litium; baterai NMC; black mass; water leaching; electro-nanofiltration; membran nanofiltrasi.

ABSTRACT

The rapid growth of electric vehicles and energy storage systems has led to a substantial increase in global lithium demand. At the same time, limitations in primary lithium resources and environmental concerns associated with conventional mining practices have intensified interest in lithium recovery from secondary sources, particularly spent lithium-ion batteries. Among various battery chemistries, nickel–manganese–cobalt (NMC) batteries are widely used, making their waste streams a promising secondary lithium resource.

Aqueous leachates obtained from the water leaching of NMC black mass contain lithium together with transition metal ions such as Ni^{2+} , Mn^{2+} , and Co^{2+} , resulting in a complex multicomponent system. This complexity poses a significant challenge for selective lithium separation, as conventional hydrometallurgical methods often rely on extensive chemical consumption and generate secondary waste. In this context, membrane-based separation, particularly electro-nanofiltration (ENF), offers a promising alternative by combining pressure-driven filtration with an externally applied electric field to enhance ion selectivity.

This study investigates the performance of an electro-nanofiltration system using an NF5 nanofiltration membrane for lithium separation from aqueous leachates derived from water-leached NMC black mass. Operating parameters were systematically varied, including transmembrane pressure (2, 4, and 6 bar) and applied electric voltage (0, 2, 4, and 6 V). Membrane characterization was conducted using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) to identify functional groups responsible for surface charge properties. Process performance was evaluated based on permeate flux, lithium ion flux, ion rejection, lithium selectivity over transition metal ions, and pH variations during operation.

The results demonstrate that the application of an electric field plays a crucial role in governing ion transport behavior within the ENF system. Increasing electric voltage significantly reduces Li^+ rejection and, under certain conditions, results in negative rejection values, indicating preferential lithium permeation driven by electromigration. In contrast, divalent ions (Ni^{2+} , Mn^{2+} , and Co^{2+}) exhibit consistently high rejection at low to intermediate pressures due to the combined effects of charge-based exclusion and steric hindrance associated with their larger hydration radii and higher hydration energies. At elevated pressures, the increased solvent flux enhances convective transport, which diminishes separation selectivity and reduces ion rejection.

Based on a comprehensive assessment of ion rejection, lithium selectivity, permeate flux, and operational stability, the optimal operating condition for lithium separation was identified at a pressure of 2 bar and an applied voltage of 6 V. Under this condition, lithium selectivity over NMC transition metals was maximized, with Ni^{2+} , Mn^{2+} , and Co^{2+} rejection exceeding 99.99%, and the highest and most stable permeate flux and lithium ion flux. These findings highlight the potential of electro-nanofiltration as an efficient and environmentally friendly approach for lithium recovery from real multicomponent leachates, providing valuable insights for the development of sustainable battery recycling technologies.

Keywords: *lithium; NMC battery; black mass; water leaching; electro-nanofiltration; nanofiltration membrane.*