

ABSTRACT

Environmental issues have become a global concern, particularly global warming driven by increasing greenhouse gas (GHG) emissions from human activities. The transportation sector contributes approximately 28% of global GHG emissions, making emission reduction in this sector a critical priority. One widely adopted solution is the transition to electric vehicles (EVs), which offer higher energy efficiency than conventional vehicles. However, rapid EV adoption also introduces new environmental challenges, including increasing demand for critical raw materials, future battery waste generation, and resource security concerns. While previous studies have largely focused on technological feasibility, material recovery, and environmental performance, limited attention has been given to how circular value is created and coordinated across EV ecosystems, particularly in developing-country contexts.

The implementation of a circular economy provides a strategic approach to addressing these challenges by slowing, closing, and narrowing material and energy loops through reuse, remanufacturing, repurposing, recycling, and product life extension. Accordingly, this study aims to analyze ecosystem-level circular value creation within Indonesia's electric motorcycle ecosystem by integrating the Circular Business Model Innovation (CBMI) framework with Petri Net (PN) simulation.

The study was conducted in three stages. First, a systematic literature review was performed to identify circularity potentials, enabling factors, barriers, modelling approaches, and policy interventions related to circular supply chains in the electric vehicle industry. Second, the CBMI framework was applied to analyze how circular value is proposed, created, delivered, and captured across Indonesia's electric motorcycle ecosystem. Third, the resulting ecosystem configuration was operationalized into a Petri Net simulation model to evaluate alternative circular economy implementation scenarios, including different recovery pathway configurations and Extended Producer Responsibility (EPR).

The findings reveal that circular value creation has begun to emerge



through interactions among multiple ecosystem actors, although circular activities remain fragmented and concentrated in downstream functions such as repair, maintenance, and waste management. The simulation results further demonstrate that improving circular supply chain performance depends not only on strengthening individual recovery pathways but also on enhancing ecosystem-wide coordination. Among the evaluated scenarios, the EPR scenario consistently generated the highest levels of product recovery, material recovery, and value retention while minimizing waste generation.

This study contributes to the circular economy literature by shifting the analytical focus from technological and material recovery perspectives toward ecosystem-level circular value creation. It further extends CBMI research by demonstrating its application to Indonesia's electric motorcycle ecosystem and contributes methodologically by integrating ecosystem-level CBMI analysis with Petri Net simulation to enable dynamic evaluation of alternative circular economy implementation scenarios. The findings provide practical insights for policymakers and industry practitioners in designing integrated circular supply chain systems to support sustainable electric mobility.

Keywords: circular economy; circular value creation; electric motorcycles; circular supply chain; sustainable transportation; Indonesia.

INTISARI

Permasalahan lingkungan telah menjadi perhatian global, terutama pemanasan global yang didorong oleh meningkatnya emisi gas rumah kaca (GRK) akibat aktivitas manusia. Sektor transportasi menyumbang sekitar 28% emisi GRK global, sehingga pengurangan emisi pada sektor ini menjadi prioritas penting. Salah satu solusi yang banyak diadopsi adalah transisi menuju kendaraan listrik (*electric vehicles*), yang beroperasi sepenuhnya menggunakan energi listrik dan menawarkan efisiensi energi yang lebih tinggi dibandingkan kendaraan konvensional. Namun demikian, adopsi kendaraan listrik juga menimbulkan berbagai tantangan lingkungan. Tantangan tersebut meliputi potensi pergeseran emisi dari penggunaan kendaraan ke pembangkitan listrik, timbulnya limbah di masa depan yang berasal dari material berbahaya dan sulit terurai, serta ketergantungan pada bahan baku kritis dan tidak terbarukan yang ketersediaannya semakin terbatas.

Penerapan ekonomi sirkular menawarkan pendekatan strategis untuk mengurangi dampak tersebut melalui upaya memperlambat, menutup, dan mempersempit siklus material dan energi melalui strategi penggunaan kembali (*reuse*), manufaktur ulang (*remanufacturing*), daur ulang (*recycling*), dan perpanjangan masa pakai produk (*life extension*). Dalam konteks tersebut, penelitian ini bertujuan untuk memetakan dan mengevaluasi penciptaan nilai sirkular (*circular value creation*) pada rantai pasok sepeda motor listrik di Indonesia dengan mengintegrasikan wawasan teoretis mengenai rantai pasok sirkular kendaraan listrik, analisis studi kasus empiris, dan pemodelan simulasi.

Penelitian ini dilaksanakan dalam tiga tahapan. Tahap pertama adalah tinjauan pustaka sistematis (*systematic literature review*) untuk mengidentifikasi potensi sirkularitas, faktor-faktor yang memengaruhi, pendekatan pemodelan, serta intervensi kebijakan yang berkaitan dengan rantai pasok sirkular dalam industri kendaraan listrik. Tahap kedua adalah pemetaan penciptaan nilai sirkular pada rantai pasok sepeda motor listrik di Indonesia. Fokus penelitian pada sepeda motor listrik didasarkan pada potensi komersialnya yang besar serta perannya yang dominan dalam pasar kendaraan listrik Indonesia. Tahap ini mengkaji bagaimana nilai sirkular diusulkan,



diciptakan, disampaikan, dan diperoleh oleh berbagai aktor dalam ekosistem. Tahap ketiga adalah menerjemahkan konfigurasi rantai pasok sirkular yang telah dipetakan ke dalam model simulasi Petri Net (PN) untuk mengeksplorasi berbagai skenario kebijakan ekonomi sirkular secara eksperimental. Simulasi digunakan untuk menganalisis pengaruh berbagai konfigurasi kebijakan, termasuk variasi tingkat daur ulang, prioritas perbaikan, intensitas manufaktur ulang, jalur alih fungsi (repurposing), dan mekanisme pemulihan pada akhir masa pakai produk (end-of-life recovery), terhadap aliran material sirkular, jalur pemulihan, dan perilaku sistem secara keseluruhan dalam ekosistem.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penciptaan nilai sirkular dalam ekosistem sepeda motor listrik di Indonesia telah mulai berkembang melalui interaksi berbagai pemangku kepentingan, meskipun sebagian besar aktivitas sirkular masih bersifat terfragmentasi dan belum terintegrasi secara optimal dalam rantai pasok. Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa peningkatan kinerja rantai pasok sirkular tidak hanya bergantung pada penguatan masing-masing jalur pemulihan, tetapi juga pada peningkatan koordinasi antarpelaku dalam ekosistem. Dari berbagai intervensi yang dievaluasi, kebijakan Extended Producer Responsibility (EPR) menghasilkan manfaat sirkular yang paling besar secara keseluruhan karena mampu meningkatkan pemulihan produk, pemulihan material, dan pengurangan limbah secara simultan.

Temuan penelitian ini berkontribusi pada pengembangan pemahaman mengenai implementasi ekonomi sirkular di negara berkembang serta memberikan wawasan pendukung pengambilan keputusan bagi pembuat kebijakan dan pelaku industri dalam merancang sistem rantai pasok sirkular yang lebih terintegrasi guna mendukung mobilitas listrik yang berkelanjutan.

Kata kunci: ekonomi sirkular; penciptaan nilai sirkular; rantai pasok sirkular; sepeda motor listrik; mobilitas berkelanjutan; Indonesia.