

Peningkatan kebutuhan energi dan komitmen Indonesia terhadap target *Net Zero Emission* (NZE) tahun 2060 atau lebih cepat menuntut transformasi mendasar pada sektor ketenagalistrikan. Pemerintah telah mengembangkan kerangka kebijakan *carbon pricing* yang mencakup *Carbon Tax* (CT) dan *Emission Trading System* (ETS), serta mendorong pengembangan teknologi *Carbon Capture and Storage* (CCS) untuk mengurangi emisi dari pembangkit berbasis fosil. Penelitian ini dilakukan untuk mengatasi tantangan integrasi antara kebijakan ekonomi dan teknologi dekarbonisasi melalui pengembangan model perencanaan pembangkit tenaga listrik berbasis *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) dengan horizon perencanaan 2025–2050, yang merepresentasikan fase transisi kunci menuju NZE Indonesia 2060 sejalan dengan *Paris Agreement* dan *Long Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience* (LTS-LCCR) Indonesia 2050. Model ini mengintegrasikan kebijakan *carbon pricing* dan teknologi CCS untuk menilai keterkaitan antara kebijakan, teknologi, kapasitas sistem, serta biaya investasi secara kuantitatif. Model mensimulasikan enam skenario kebijakan, yaitu *No Policy* (NP), CT, ETS, CCS, EC (ETS+CCS), dan CEC (CT+ETS+CCS). Hasil simulasi menunjukkan bahwa kombinasi kebijakan CT, ETS, dan CCS menghasilkan pengurangan emisi terbesar hingga 68,2% pada tahun 2050 dibandingkan NP, menurunkan emisi dari 1.222,8 menjadi 389,1 MtCO₂. Pada saat yang sama, proporsi energi terbarukan meningkat hingga 87,1% dari total produksi energi listrik nasional yang mencapai 1.765,46 TWh, dengan kontribusi utama berasal dari ekspansi tenaga surya, panas bumi, dan hidro. Total kapasitas terpasang sistem bervariasi antar skenario, meningkat dari 91,54 GW pada NP tahun 2030 menjadi 616,05 GW pada CEC tahun 2050, dengan skenario CEC menunjukkan ekspansi terbesar untuk mendukung integrasi energi terbarukan dan menjaga keandalan sistem. Pada 2050, kebutuhan investasi modal tahunan dalam skenario CEC mencapai USD 78,42 miliar dibandingkan dengan USD 26,33 miliar pada skenario NP; pada 2040, masing-masing sebesar USD 44,58 miliar dan USD 13,31 miliar; sedangkan pada 2025 mencapai USD 16,19 miliar dan USD 5,14 miliar. Pola ini menunjukkan bahwa semakin ketat kebijakan dekarbonisasi, semakin besar kebutuhan alokasi modal untuk mendukung ekspansi kapasitas rendah karbon. Selain itu, teknologi CCS berkontribusi terhadap penangkapan karbon sebesar 29,4 MtCO₂ pada skenario acuan (CEC *baseline* 2050), dari total emisi pembangkit fosil sebesar 389,1 MtCO₂, menunjukkan peran pentingnya sebagai pelengkap kebijakan dekarbonisasi dalam mencapai pengurangan emisi yang lebih mendalam. Analisis sensitivitas memperlihatkan bahwa penurunan CAPEX solar PV sebesar 20%, peningkatan harga karbon hingga 100 USD per ton CO₂, dan pengetatan batas emisi sebesar 20% mempercepat penetrasi energi bersih, meningkatkan pemanfaatan teknologi CCS, serta memperkuat efektivitas kebijakan dekarbonisasi jangka panjang. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kebijakan harga karbon yang konsisten dan peningkatan efisiensi teknologi berperan penting dalam memperkuat efisiensi sistem dan ketahanan energi nasional. Temuan ini menegaskan bahwa sinergi kebijakan ekonomi dan teknologi dekarbonisasi merupakan strategi paling efektif dan berkelanjutan untuk mencapai target NZE sektor ketenagalistrikan Indonesia, serta menjadi dasar empiris bagi perumusan kebijakan transisi energi yang adaptif terhadap ketidakpastian ekonomi global dan perkembangan teknologi di masa depan.

Kata kunci—NZE, *carbon pricing*, CT, ETS, CCS, dekarbonisasi, MILP.

ABSTRACT

The growing energy demand and Indonesia's commitment to achieving the Net Zero Emission (NZE) target by 2060 or earlier necessitate a fundamental transformation of the power sector. The government has established a comprehensive carbon pricing framework encompassing the Carbon Tax (CT) and the Emission Trading System (ETS), while promoting the deployment of Carbon Capture and Storage (CCS) technologies to mitigate emissions from fossil based power generation. This study addresses the challenges of integrating economic policy and decarbonization technologies through the development of a Mixed Integer Linear Programming (MILP) based power generation planning model for the 2025 to 2050 planning horizon, representing a critical transition phase toward Indonesia's 2060 NZE target in line with the Paris Agreement and Indonesia's Long Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience (LTS-LCCR) 2050. The model integrates carbon pricing instruments and CCS technology to quantitatively assess the interlinkages among policy design, technology deployment, system capacity, and investment cost. Six policy scenarios are evaluated, namely No Policy (NP), CT, ETS, CCS, EC (ETS+CCS), and CEC (CT+ETS+CCS). The simulation results indicate that the combined implementation of CT, ETS, and CCS achieves the highest emission reduction, reaching 68.2% by 2050 relative to the NP scenario, with emissions declining from 1,222.8 to 389.1 MtCO₂. At the same time, the renewable energy share increases to 87.1% of total national electricity generation, reaching 1,765.46 TWh, primarily driven by the expansion of solar, geothermal, and hydropower. Total installed capacity varies across scenarios, rising from 91.54 GW in the NP scenario in 2030 to 616.05 GW in the CEC scenario by 2050, with the CEC scenario exhibiting the largest capacity expansion to support renewable integration and maintain system reliability. Annual investment requirements under the CEC scenario reach USD 78.42 billion in 2050 compared to USD 26.33 billion under the NP scenario; in 2040, the corresponding values are USD 44.58 billion and USD 13.31 billion; and in 2025, USD 16.19 billion and USD 5.14 billion, respectively. This pattern highlights that increasingly stringent decarbonization policies require higher capital allocations to support low carbon capacity expansion. Moreover, CCS contributes 29.4 MtCO₂ of captured emissions in the reference case (CEC baseline 2050) from a total of 389.1 MtCO₂ emitted by fossil based power plants, underscoring its complementary role in achieving deeper emission reductions. Sensitivity analysis further reveals that a 20% reduction in solar PV CAPEX, an increase in the carbon price to 100 USD per ton CO₂, and a 20% tightening of the emission cap accelerate clean energy penetration, enhance CCS utilization, and strengthen the long term effectiveness of decarbonization policies. Overall, the findings demonstrate that consistent carbon pricing and improvements in technological efficiency play a crucial role in enhancing system efficiency and national energy resilience, confirming that the synergy between economic instruments and decarbonization technologies represents the most effective and sustainable pathway toward achieving the NZE target in Indonesia's power sector under global economic and technological uncertainties.

Keywords—NZE, carbon pricing, CT, ETS, CCS, decarbonization, MILP.