

INTISARI

Indonesia menargetkan *Net Zero Emission* (NZE) 2060 dengan PLTS sebagai salah satu tumpuan *variable renewable energy* (VRE). Namun, pertumbuhan PLTS akan menghasilkan limbah panel surya yang perlu dikelola selaras prinsip ekonomi sirkular untuk mendukung SDG 7 (Energi Bersih dan Terjangkau), SDG 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab), dan SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim). Penelitian ini menggunakan pendekatan sistem dinamis (Vensim) untuk menganalisis proyeksi pertumbuhan PLTS Indonesia hingga 2060 serta dampak kebijakan pengelolaan limbah panel surya (*landfill*, *downcycling*, dan *upcycling*) terhadap aspek ekonomi dan lingkungan, termasuk skenario tambahan instrumen pendapatan REC dan SPE-GRK. Hasil simulasi menunjukkan bahwa skenario BaU memproyeksikan kapasitas PLTS mencapai 131,26 GW pada 2060 dengan CAGR 2015–2060 sebesar 20,224%, sehingga target peta jalan transisi energi berpotensi tercapai. Seiring itu, limbah panel surya kumulatif diproyeksikan mencapai 1,5 juta ton (2050) dan 4,8 juta ton (2060), dengan laju timbulan tahunan meningkat dari 996 ton/tahun (2025) menjadi 497 ribu ton/tahun (2060). Temuan ini menegaskan urgensi penetapan klasifikasi dan kode limbah khusus modul surya serta kajian komprehensif agar limbah panel surya dapat diintegrasikan ke dalam peta jalan dan rencana aksi ekonomi sirkular, termasuk perencanaan kapasitas dan infrastruktur pengolahannya. Kebijakan pengelolaan limbah cenderung meningkatkan biaya dan menurunkan pertumbuhan PLTS, namun dampaknya tidak signifikan. Dari sisi lingkungan, terdapat *trade-off* yang jelas: semakin besar manfaat lingkungan yang dicapai, semakin besar biaya yang dibutuhkan. Instrumen REC dan SPE-GRK mampu memitigasi penurunan pertumbuhan akibat kebijakan pengelolaan limbah melalui peningkatan pendapatan, meskipun pada alternatif *upcycling* laju pertumbuhan masih sedikit di bawah skenario BaU (0,004%). Secara keseluruhan, alternatif pengelolaan limbah panel surya perlu diintegrasikan dalam perencanaan energi nasional jangka panjang untuk menjaga keberlanjutan pertumbuhan PLTS sekaligus mendukung pencapaian SDG 7, SDG 12, dan SDG 13.

Kata Kunci: PLTS, limbah panel surya, sistem dinamis, *landfill*, *downcycling*, *upcycling*, ekonomi sirkular

ABSTRACT

Indonesia is targeting Net Zero Emissions (NZE) by 2060, with solar PV (PLTS) as one of the key pillars of variable renewable energy (VRE). However, continued PV deployment will generate end-of-life solar panel waste, which must be managed in line with circular economy principles to support SDG 7 (Affordable and Clean Energy), SDG 12 (Responsible Consumption and Production), and SDG 13 (Climate Action). This study applies a system dynamics approach (Vensim) to analyze Indonesia's PV growth projection up to 2060 and to assess the economic and environmental impacts of PV waste management policies—landfilling, downcycling, and upcycling—including additional scenarios with revenue instruments from Renewable Energy Certificates (REC) and GHG Emission Reduction Certificates (SPE-GRK). Simulation results indicate that the business-as-usual (BaU) scenario projects PV capacity to reach 131.26 GW by 2060, with a 2015–2060 CAGR of 20.224%, suggesting that the national energy transition roadmap target is likely achievable. In parallel, cumulative PV waste is projected to reach 1.5 million tons by 2050 and 4.8 million tons by 2060, while annual waste generation increases from 996 tons/year in 2025 to 497 thousand tons/year in 2060. These findings underline the urgency of establishing a specific waste classification and code for PV modules, as well as conducting comprehensive assessments so that PV waste can be integrated into the circular economy roadmap and action plan, including adequate planning for treatment capacity and supporting infrastructure. PV waste management policies tend to increase costs and reduce PV growth, although the impact is not significant. From an environmental perspective, a clear trade-off emerges: achieving greater environmental benefits requires higher costs. The REC and SPE-GRK instruments can mitigate the reduction in PV growth caused by waste management policies by increasing revenue; however, under the upcycling option, the growth rate remains slightly below the BaU scenario (by 0.004%). Overall, PV waste management options need to be integrated into long-term national energy planning to ensure sustained PV growth while advancing SDG 7, SDG 12, and SDG 13.

Keywords : *solar PV; PV module waste; system dynamics; landfill; downcycling; upcycling; circular economy*