

INTISARI

Transisi ke sistem *photovoltaic* (PV) sebagai proses sosio-teknis melibatkan interaksi berbagai aktor diantaranya rumah tangga, industri, dan pemerintah. Mekanisme yang mendasari pola dinamis adopsi PV perlu dipahami untuk merumuskan intervensi yang efektif dan efisien guna mempercepat difusi PV. Transisi ke sistem PV memerlukan penanganan masalah permintaan dan pasokan secara bersama-sama. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan aspek penawaran yang berinteraksi dengan aspek permintaan. Kebaruan dari studi ini terletak pada pengembangan model terpadu yang menangani secara endogen baik aspek permintaan yang melibatkan faktor psikologis dan sosial dalam pengambilan keputusan dan aspek penawaran yang berhubungan dengan faktor teknis infrastruktur PV dan kebijakan pemerintah.

Pendekatan metodologis yang menggabungkan optimasi dan simulasi dengan *Agent Based Modelling* (ABM) diperkenalkan untuk mengembangkan model konseptual yang menangkap proses keputusan adopsi rumah tangga dan diparameterisasi dengan data empiris. ABM mensimulasikan pengambilan keputusan rumah tangga yang secara dinamis dipengaruhi oleh penyediaan PV dan intervensi pemerintah. *Integer Linear Programming* (ILP) digunakan untuk optimasi konfigurasi rantai pasok PV, disematkan dalam model simulasi yang dikembangkan menggunakan pemodelan dan simulasi berbasis agen. Hasil simulasi menunjukkan validasi yang baik di tingkat makro dan mikro, membuktikan bahwa metodologi yang diusulkan menjanjikan dan mampu menyediakan alat untuk evaluasi intervensi. Sepuluh skenario kebijakan dievaluasi, hasilnya menunjukkan hampir semua intervensi meningkatkan niat terhadap PV, namun tidak selalu diterjemahkan ke dalam perilaku adopsi karena kendala keuangan dan fasilitas.

Hasil evaluasi menunjukkan kebijakan saat ini yaitu tarif ekspor 100% dan insentif pemasangan PV selama tahun 2022 akan menghasilkan tingkat adopsi 24% pada tahun 2040. Nilai 40% merupakan tingkat adopsi maksimal yang dapat dicapai kebijakan saat ini setelah didukung pengembangan rantai pasok dan kampanye. Perpanjangan masa pemberian insentif dari 1 tahun menjadi 3 tahun hanya mampu menambah 2% adopter. Tingginya biaya investasi nampak masih menjadi kendala terbesar pada adopsi PV. Skenario penurunan harga PV dengan tetap menjaga tarif ekspor listrik PV 100% disertai kampanye menghasilkan 48% adopter. Saat disediakan DC di 11 lokasi menghasilkan tingkat adopsi 88%. Difusi yang luas akibat skenario ini menghasilkan reduksi GRK dalam jumlah besar dan manfaat skala ekonomi mampu menurunkan biaya rantai pasok sistem PV. Ke depan, pemerintah perlu mengalihkan insentif tidak hanya ditujukan bagi pengguna PV namun juga kepada industri untuk menstimulasi penurunan harga PV. Implikasi kebijakan dari penelitian ini diantaranya perlunya desain rantai pasok yang dinamis untuk mendukung adopsi lebih lanjut saat suatu intervensi diberlakukan. Pergeseran intervensi dari pengguna PV ke sektor industri bermanfaat menumbuhkan adopsi PV yang berkelanjutan untuk meningkatkan bauran energi terbarukan menuju tercapainya *Net Zero Emissions*.

Kata kunci: transisi sosio-teknis, *photovoltaic* (PV), pendekatan hibrid simulasi-optimasi, Indonesia

ABSTRACT

The transition to photovoltaic (PV) systems as a socio-technical process involve the interaction of various actors, including households, industry, and government. The mechanisms underlying the dynamic pattern of PV adoption need to be understood to formulate effective and efficient interventions to accelerate the diffusion of PV. Transitioning to a PV system requires addressing both supply and demand issues. This study aims to model endogenous supply aspects that interact with demand aspects. The novelty of this study lies in developing an integrated model that endogenously addresses both the demand aspects involving psychological and social factors in decision making and the supply aspects related to the technical factors of PV infrastructure and government policies. A methodological approach that combines optimization and simulation with Agent-Based Modeling (ABM) is introduced to develop a conceptual model that captures the household adoption decision process and parameterized by empirical data. ABM simulates household decision-making that is dynamically influenced by the provision of PV and government intervention. Integer Linear Programming (ILP) is used for PV supply chain configuration optimization, embedded in the simulation model developed using Agent-Based Modeling and simulation. The simulation results show good validation at the macro and micro levels, proving that the proposed methodology is promising and capable of providing tools for intervention evaluation. Ten policy scenarios were evaluated, and the results show that all interventions increase intentions towards PV but do not always translate into adoption behaviour due to financial and facility constraints.

The evaluation results show that the current policy of 100% export tariffs and incentives for installing PV during 2022 will result in an adoption rate of 24% in 2040. The value of 40% is the maximum adoption rate that the current policy can achieve. The extension of the incentive period from 1 year to 3 years can only add 2% of adopters. The high investment cost appears to be the biggest obstacle to PV adoption. The scenario of decreasing PV prices while maintaining 100% PV electricity export tariffs accompanied by a campaign to generate 48% adopters. Provided DC in 11 locations resulted in an 88% adoption. The wide diffusion of this scenario results in substantial GHG reductions, and the benefits of economies of scale keep the PV system supply chain costs low. In the future, the government needs to divert incentives aimed at PV users and the industry to stimulate a decline in PV prices. The policy implications of this research include the need for a dynamic supply chain design to support further adoption when an intervention is implemented. Intervention shifts from households to the industrial sector are beneficial to encourage the adoption of sustainable PV to increase the renewable energy mix towards achieving Net Zero Emissions.

Keywords: *socio-technical transition, photovoltaic (PV); hybrid simulation-optimization hybrid approach; Indonesia.*