

PENGEMBANGAN MODEL PERDAGANGAN ENERGI PEER-TO-PEER UNTUK INDONESIA: TINJAUAN SISTEMATIS DAN USULAN IMPLEMENTASI

I Gusti Ngurah Agung Meyhendra Wijaya ¹⁾, Muhammad Haris Pratama ¹⁾

1) Program Studi Teknik Elektro Sekolah Pascasarjana Institut Teknologi PLN

E-mail: agungmeyhendrawijaya@gmail.com

Abstrak

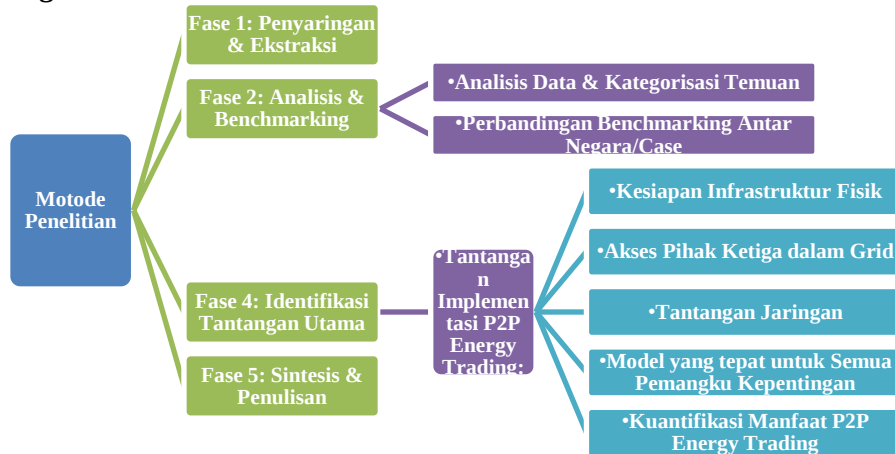
Studi ini mengusulkan model perdagangan energi peer-to-peer (P2P) yang kontekstual bagi Indonesia guna mendorong partisipasi prosumer serta mempercepat transisi menuju sistem kelistrikan yang berkelanjutan. Tanpa mekanisme P2P, kelebihan energi dari sumber terdistribusi seperti PLTS atap berisiko terbuang dan menimbulkan ketidakseimbangan jaringan, padahal berpotensi dimanfaatkan secara efisien. Penelitian dilakukan melalui Systematic Literature Review (SLR) dan comparative benchmarking dengan menelaah desain pasar, mekanisme perdagangan, infrastruktur fisik dan virtual, kebijakan, serta aspek sosial, sekaligus membandingkan struktur pasar Indonesia dengan Korea Selatan, Jerman, Thailand, Inggris, dan Singapura. Hasilnya menunjukkan P2P trading mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi terbarukan, menarik investasi distributed energy resources (DER), mengurangi rugi-rugi transmisi, serta menghadirkan transparansi melalui blockchain dan smart contract. Tantangan Indonesia meliputi dominasi struktur pasar terpusat, ketiadaan regulasi P2P, dan keterbatasan infrastruktur digital. Untuk itu, diusulkan Model Pasar Hibrida Berbasis Komunitas yang mengintegrasikan transaksi lokal dengan jaringan PLN menggunakan mekanisme Periodic Double Auction (PDA). Secara fisik, pendekatan meliputi pembangunan microgrid di wilayah 3T dan retrofitting jaringan di perkotaan, sedangkan infrastruktur virtual memadukan blockchain permissioned dan public sidechain. Rekomendasi kebijakan berupa Regulatory sandbox dan kolaborasi multi-pemangku kepentingan.

Kata kunci: Renewable energy, struktur pasar listrik, perdagangan energi, prosumer.

Pendahuluan

Perubahan iklim mendorong kebutuhan transisi energi global menuju sistem listrik berkelanjutan. Sektor kelistrikan menjadi penyumbang signifikan emisi gas rumah kaca, termasuk di Indonesia, sehingga diperlukan strategi yang memenuhi trilema energi: berkelanjutan, aman, dan terjangkau [1]. Indonesia telah menargetkan peningkatan bauran energi terbarukan (EBT), dengan perkembangan signifikan pada pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atap. Namun, tanpa mekanisme khusus, surplus energi PLTS berisiko terbuang atau menimbulkan ketidakseimbangan jaringan. Hal ini mengubah peran konsumen tradisional menjadi prosumer, pihak yang sekaligus memproduksi dan mengonsumsi energi [2]. Skema seperti net metering dan feed-in tariff (FiT) telah diperkenalkan, tetapi dinilai belum cukup mendorong partisipasi prosumer maupun memberikan insentif ekonomi yang optimal. Selain itu, daerah dengan penetrasi EBT tinggi berpotensi menghadapi grid congestion, akibat keterbatasan kapasitas distribusi lokal. Perdagangan energi P2P menawarkan solusi desentralistik yang memungkinkan prosumer menjual kelebihan energi secara langsung kepada konsumen dengan dukungan teknologi digital seperti blockchain, meter pintar, dan platform otomatis [3]. Model ini menjanjikan efisiensi distribusi energi, transparansi transaksi, serta pemberdayaan prosumer. Walaupun implementasi skala nasional masih terbatas, proyek percontohan di berbagai negara menunjukkan potensi besar sebagai evolusi dari mekanisme Net Metering. Penelitian ini bertujuan mengusulkan model perdagangan energi P2P yang sesuai dengan konteks Indonesia. Analisis dilakukan melalui SLR dan comparative benchmarking dengan negara seperti Korea Selatan, Jerman, Thailand, Inggris, dan Singapura. Kontribusi utama mencakup struktur pasar listrik dan implikasinya terhadap adopsi P2P, mengidentifikasi tantangan teknis maupun non-teknis dari implementasi lintas negara, dan merumuskan model P2P berbasis atribut keberhasilan global yang relevan untuk Indonesia. Struktur penelitian ini terdiri atas metode penelitian, tinjauan struktur pasar dan studi kasus internasional, analisis perbandingan dan tantangan, model usulan untuk Indonesia, dan Kesimpulan.

Metodologi Penelitian



Gambar 1. Metode penelitian dengan *systematic literature review* dengan *benchmarking comparison*

SLR adalah metode penelitian yang menggunakan pendekatan terstruktur dan transparan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis semua bukti ilmiah yang relevan mengenai pertanyaan penelitian tertentu. Sementara itu, *Benchmarking Comparison* dengan proses perbandingan kinerja, praktik, atau strategi antara beberapa entitas seperti, negara atau proyek. Metode SLR dipilih untuk identifikasi, evaluasi, dan sintesis literatur yang komprehensif dan tidak bias mengenai implementasi P2P energy trading. Pendekatan ini dilengkapi dengan *Benchmarking Comparison* untuk membandingkan secara sistematis berbagai strategi dan hasil implementasi di negara-negara terkait, mengungkap tantangan umum serta praktik terbaik. Pemilihan kombinasi metode ini bertujuan untuk menganalisis isu-isu dalam adopsi P2P energy trading secara global, yang akan memberikan wawasan berbasis bukti dan rekomendasi untuk merancang skema P2P.

Studi Komparasi Perdagangan Energi Peer to Peer Perbandingan Kemudahan Akses Kelistrikan antar Negara

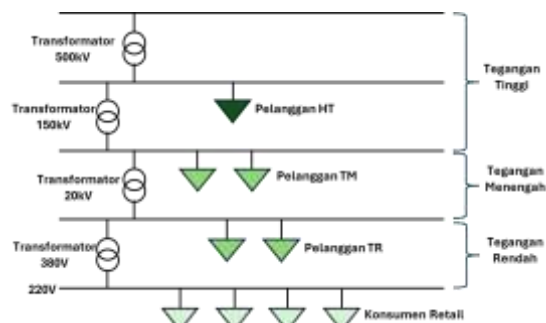
Tabel 1. Perbandingan Peringkat dan Skor Getting Electricity Antar Negara

Negara	Peringkat/Skor	Struktur Pasar Listrik	Bauran EBT (%)	Sumber
Indonesia	33/ Jakarta: 87,1 Surabaya: 88,0	Sebagian terintegrasi vertikal (PLN dominan)	24%	[4]
Malaysia	4/ 99,3	Sebagian terintegrasi vertikal, regulator kuat	33%	[4]
Thailand	6/ 98,7	Sebagian terintegrasi vertikal, single buyer	29%	[4]
Singapura	19/ 95,4	Terliberalisasi penuh	5%	[5]
Jerman	5/ 90,0	Terliberalisasi penuh, kompetitif	60%	[4], [6]
Inggris	8/ 8	Terliberalisasi penuh, kompetitif	48%	[6]
Korea Selatan	2/ 89,4	Sebagian terintegrasi vertikal, KEPCO dominan	18%	[6]

Indikator *Getting Electricity* dari World Bank menilai kemudahan sambungan listrik berdasarkan prosedur, waktu, biaya, keandalan pasokan, dan transparansi tarif [4]. Indikator ini menjadi penting untuk menilai kesiapan pasar terhadap implementasi perdagangan energi P2P, karena efisiensi infrastruktur dan tarif merupakan prasyarat partisipasi prosumer [1].

Komparasi Struktur Pasar Listrik

Struktur pasar listrik di Indonesia dikendalikan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) sebagai regulator dan PLN sebagai utilitas dominan yang menguasai hampir seluruh rantai pasok, mulai dari pembangkitan hingga distribusi. Sejak UU No. 15/1985, PLN berperan sebagai pemegang kuasa tunggal, dan meskipun regulasi berikutnya membuka peluang bagi Independent Power Producers (IPP), skema *single buyer* tetap membuat PLN sebagai pembeli utama. Hal ini menutup ruang kompetisi langsung ke konsumen dan menjadikan pasar listrik tetap terintegrasi secara vertikal [7], [8]. Tantangan geografis Indonesia sebagai negara kepulauan menambah kompleksitas pemerataan akses, sementara wacana *power wheeling* untuk memungkinkan transaksi antar pelaku usaha masih dalam tahap kajian [9], [10]. Malaysia memiliki pasar dengan model *single buyer*, di mana Tenaga Nasional Berhad (TNB) membeli listrik dari IPP untuk distribusi nasional. Regulasi dilakukan oleh Suruhanjaya Tenaga, sedangkan Sarawak Energy berperan di wilayah Sarawak. Sektor ritel mulai dibuka untuk meningkatkan kompetisi dan efisiensi harga [11], [12]. Korea Selatan masih didominasi oleh Korea Electric Power Corporation (KEPCO), yang menguasai transmisi, distribusi, dan ritel. Namun, IPP berperan dalam pembangkitan dan reformasi menuju liberalisasi ritel mulai dijalankan. Rencana penerapan nodal pricing serta kebijakan dekarbonisasi menandakan arah transisi ke sistem yang lebih kompetitif [13], [14], [15]. Pasar listrik Jerman sepenuhnya terliberalisasi dengan keterlibatan luas IPP, komunitas energi, dan prosumer. Regulasi dilakukan Bundesnetzagentur, sementara empat operator utama mengelola transmisi. Distribusi dilayani oleh ratusan DSO regional. Struktur ini mendorong partisipasi aktif konsumen dalam produksi energi serta mendukung integrasi energi terbarukan melalui kebijakan *Energiewende* [16], [17], [18]. Thailand masih menggunakan model *single buyer* dengan EGAT sebagai pembangkit dominan sekaligus pembeli listrik dari IPP dan SPPs. Distribusi diatur oleh MEA di Bangkok dan PEA di wilayah lain. Reformasi regulasi melalui Energy Industry Act 2007 mendukung masuknya energi terbarukan, mikrogrid, dan proyek P2P dalam sistem kelistrikan nasional [19], [20]. Inggris menjalankan pasar listrik yang sepenuhnya liberal sejak Electricity Act 1989, dengan pemisahan fungsi pembangkitan, transmisi, distribusi, dan ritel. OFGEM bertindak sebagai regulator utama yang menjamin transparansi, harga yang kompetitif, serta perlindungan konsumen. Konsumen bebas memilih penyedia energi, sementara proyek energi komunitas dan perdagangan P2P berkembang pesat [21]. Singapura, negara pertama di Asia Tenggara yang meliberalisasi pasar listrik sejak 1998, mengoperasikan National Electricity Market of Singapore (NEMS) di bawah pengawasan Energy Market Authority (EMA). SP Group mengelola transmisi dan distribusi, sementara konsumen dapat memilih penyedia listrik melalui Open Electricity Market. Program *Demand Response* juga telah diterapkan untuk meningkatkan efisiensi sistem [22].



Gambar 2. Tingkat tegangan jaringan umum & representasi pelanggan listrik Indonesia yang disimplifikasi

Pengembangan Serta Penerapan Perdagangan Energi Peer to Peer

Tabel 2. Studi Kasus Penerapan Perdagangan Energi P2P

Teknologi	Implementasi	Dampak	Referensi
<i>Microgrid</i> , Home Energy Management Systems (HEMS)	Proyek Percontohan "Sustainable Energy through P2P Trading" (Indonesia)	Mendorong transaksi energi antar rumah tangga, memperkuat prosumer, dan meningkatkan ketahanan energi lokal; menghadapi isu regulasi, perlindungan konsumen, keterbatasan infrastruktur, dan minim edukasi.	[23], [24], [25], [26]
IoT, Mekanisme Lelang, Teori permainan	Proyek Percontohan oleh TNB dalam <i>Regulatory sandbox</i> (Malaysia)	Fasilitas perdagangan energi antara prosumer dan konsumen komersial, memperluas partisipasi melalui model lelang dan <i>game theory</i> ; terkendala regulasi terpusat, kurangnya kolaborasi sektor, dan minim insentif.	[23], [27], [28], [29], [30]
Smart Grid, Sistem Penyimpanan Energi	Platform P2P berbasis Token di Chuncheon & Proyek T77 P2P (Korea Selatan)	Potensi tokenisasi energi terbarukan untuk transaksi lokal dan optimasi multi-objektif antara konsumen dan prosumer; dibatasi hambatan regulasi, mekanisme harga yang belum optimal, rendahnya partisipasi pemangku kepentingan.	[31], [32], [33], [34]
<i>Microgrid</i> , Komunitas Energi Lokal, Blockchain, <i>Smart contract</i> ,	Proyek Enerchain, Elbflorenz (BLEMs), FLEXGRID, SolaRes (Jerman)	Mendorong efisiensi dan keberlanjutan melalui perdagangan energi terdesentralisasi tanpa perantara; tantangan integrasi teknologi, kendala hukum, dan resistensi pasar.	[35], [36], [37], [38], [39], [40]
<i>Microgrid</i> , <i>Regulatory sandbox</i>	Perdagangan Komunitas Mikrogrid oleh EGAT & Uji Coba dalam <i>Regulatory sandbox</i> (Thailand)	Mengoptimalkan distribusi lokal, menurunkan biaya, mempercepat adopsi energi terbarukan melalui <i>sandbox</i> regulasi; berisiko menghadapi kemacetan jaringan, fluktuasi harga, dan keterbatasan kerangka infrastruktur.	[41], [42], [43], [44], [45], [46]
<i>Flexibility Markets</i> ,	Platform Piclo Flex & Proyek Powerpeers (Inggris)	Fleksibilitas perdagangan rumah tangga dan bisnis ,meningkatkan peran prosumer; terdapat isu integrasi sumber EBT, kompleksitas teknologi, serta privasi dan keamanan data.	[36], [47], [48], [49], [50]
Blocakchain, Smart Grid, <i>Vehicle-to-Grid</i> (V2G)	Uji Coba P2P oleh SEAS & SP Group (Singapura)	<i>Platform</i> aman dan transparan, pemilik EV menjadi prosumer melalui integrasi V2G; tantangannya regulasi ketat, manajemen jaringan, dan kepatuhan sistem.	[51], [52], [53]

Hasil dan Pembahasan

Tantangan dan Hambatan Penerapan Perdagangan Energy Peer to Peer

- a. Dampak Struktur Pasar Terhadap Implementasi P2P Energy Trading
Pasar yang terbuka dan fleksibel mampu mendukung peran prosumer serta mempercepat integrasi energi terbarukan. Sebaliknya, dominasi utilitas terpusat dan regulasi yang kaku dapat menjadi penghambat adopsi sistem ini [54], [55]. Desain pasar yang adaptif terbukti mampu meningkatkan efisiensi lokal, memperkuat resiliensi jaringan, dan mengurangi emisi karbon [56], [57]. Model bisnis P2P dapat berbentuk *full* P2P yang memungkinkan perdagangan bilateral, *community-based* dengan pengelolaan oleh agregator, maupun hibrida yang menggabungkan keduanya [58]. Efisiensi pasar juga bergantung pada algoritma perdagangan yang digunakan, mulai dari strategi berbasis *game theory* hingga mekanisme *double auction* atau optimisasi terdistribusi, dengan tujuan mencapai alokasi energi yang adil dan efisien. Pendekatan *teori permainan* memberikan kerangka matematis untuk menganalisis perilaku strategis antar prosumer, baik dalam skema non-kooperatif dengan Nash Equilibrium maupun dalam bentuk kooperatif dengan pembentukan koalisi. Selain itu, mekanisme lelang berbasis blockchain, baik *dynamic* maupun *sealed-bid*, banyak digunakan untuk mempertemukan penawaran dan permintaan energi, dengan variasi skema harga uniform pricing atau *discriminatory pricing*. Namun, hambatan tetap muncul berupa resistensi dari utilitas konvensional, keterbatasan literasi energi, serta kebutuhan dukungan regulasi dan pendanaan [58].
- b. Kesiapan Infrastruktur Fisik
Sistem komunikasi *real-time* sangat diperlukan untuk memastikan monitoring dan kendali jaringan desentralisasi [59]. Teknologi blockchain memperkuat keamanan transaksi sekaligus meningkatkan kepercayaan pengguna [60]. Integrasi DER seperti panel surya dan turbin angin terbukti dapat meningkatkan efisiensi sistem distribusi dan mengurangi ketergantungan pada pembangkit konvensional [61]. Tantangan muncul karena jaringan listrik tradisional masih dirancang terpusat dan kurang fleksibel untuk menghadapi volume transaksi dalam skema P2P. Keterbatasan kapasitas, rendahnya interoperabilitas, serta ketidakmerataan infrastruktur di negara berkembang memperburuk hambatan teknis ini [56], [62]. Apabila pengembangan infrastruktur dilakukan secara terpadu dengan dukungan regulasi adaptif dan insentif bagi prosumer, maka perdagangan energi P2P dapat meningkatkan efisiensi operasional sistem distribusi, mengurangi tekanan pada grid utama, serta memperluas partisipasi prosumer [63], [64].
- c. Akses Pihak Ketiga & Tantangan Jaringan Listrik
Implementasi TPA memungkinkan agregator, platform digital, maupun penyedia layanan energi masuk ke dalam sistem untuk memfasilitasi koordinasi *supply-demand*. Dari sisi teknis, hal ini menuntut desain arsitektur *multi-layer* yang mencakup: lapisan komunikasi berbasis Advanced Metering Infrastructure (AMI), lapisan kontrol berbasis *smart contracts* untuk eksekusi otomatis, serta lapisan integrasi pasar melalui algoritma market clearing berbasis blockchain [65]. Namun, keterbatasan regulasi yang belum mengakomodasi peran pihak ketiga masih menjadi hambatan. Integrasi TPA pada grid konvensional memerlukan mekanisme power wheeling agar energi dari prosumer dapat ditransmisikan melalui jaringan distribusi minim gangguan kualitas daya. Keterlibatan pihak ketiga juga menuntut protokol interoperabilitas antara DER, agregator, dan utilitas, termasuk penggunaan standar IEC 61850 untuk komunikasi sistem tenaga. Tanpa dukungan regulasi dan standar teknis ini, P2P berisiko menciptakan ketidakseimbangan sistem yang memengaruhi stabilitas grid [66]. Penerapan P2P di jaringan konvensional menghadapi tantangan teknis signifikan. Pertama adalah pengelolaan aliran daya *real-time* yang dinamis akibat variabilitas DER berbasis surya dan angin. Hal ini menuntut integrasi Distributed Energy Management Systems (DERMS) dengan algoritma optimisasi multi-objektif untuk menjaga frekuensi dan tegangan dalam batas standar IEEE 1547. Kedua adalah potensi power loss

pada distribusi jarak dekat, yang dapat dikurangi melalui optimasi topologi *microgrid* dengan algoritma *optimal power flow* (OPF) berbasis desentralisasi [67]. Ketiga adalah kebutuhan perhitungan biaya jaringan berbasis *granular tariff*, di mana tarif dihitung berdasarkan lokasi, waktu, dan intensitas penggunaan grid. Tanpa mekanisme ini, terdapat risiko *free-riding* dari prosumer yang membebani jaringan tanpa membayar biaya pemeliharaan yang adil [62].

Tabel 3. Manfaat Implementasi Perdagangan Energi P2P

Aspek & Manfaat	Dampak Spesifik	Referensi
Ekonomi, Pengurangan biaya energi	Hemat biaya 4%–6.8% melalui pemanfaatan energi terbarukan lokal tanpa utilitas tradisional	[29]
Ekonomi, Investasi DER lebih menarik	DER mempercepat pengembalian modal dan meningkatkan insentif pemasangan teknologi terbarukan	[68], [69]
Teknis, Efisiensi manajemen beban	Pertukaran energi lokal mengurangi biaya kemacetan dan stres jaringan saat permintaan tinggi	[70]
Teknis, Reduksi ketergantungan pusat	Supply-demand lokal menekan konsumsi dari sumber terpusat mahal dan tidak ramah lingkungan	[41]
Teknis, Penurunan rugi transmisi	Perdagangan komunitas memotong transmisi jarak jauh, menurunkan rugi daya sistem listrik	[44]
Lingkungan, Dukungan sistem rendah karbon	Mendorong kendaraan listrik dan penyimpanan energi untuk transisi energi	[51], [71]
Teknologi, Transparansi & efisiensi	Blockchain menyederhanakan transaksi, menjamin transparansi, mengurangi ketergantungan perantara	[28], [60], [72]

d. Pemilihan Model yang Tepat dan Pengukuran Manfaat P2P Energy Trading

Dari sisi desain pasar, terdapat tiga model dominan yaitu full P2P, community-based, dan hibrida. Model full P2P memungkinkan bilateral trading melalui blockchain, sedangkan community-based bergantung pada aggregator dengan algoritma market clearing berbasis double auction. Model hibrida menggabungkan keduanya, memberi fleksibilitas lebih tinggi hanaruntuk berbagai skenario operasi [58]. Mekanisme *market clearing* dapat dioptimalkan dengan algoritma *multi-agent reinforcement learning* (MARL), yang memungkinkan agen prosumer belajar pola konsumsi dan produksi untuk menghasilkan strategi penawaran dinamis. Pendekatan teori permainan juga digunakan untuk membentuk koalisi prosumer dengan mekanisme pembagian keuntungan berbasis Shapley value [41], manfaat ini dapat diidentifikasi melalui sejumlah indikator kinerja yang saling melengkapi. Efisiensi ekonomi diukur dengan membandingkan total biaya sistem sebelum dan sesudah penerapan P2P, sementara *loss reduction ratio* (LRR) digunakan untuk menilai penurunan rugi-rugi daya pada jaringan distribusi lokal. Indikator lain adalah *peak-to-average ratio* (PAR) yang menunjukkan perbaikan profil beban akibat redistribusi energi secara lokal, *renewable integration index* (RII) yang mengukur peningkatan penetrasi energi terbarukan melalui skema P2P, serta *carbon abatement factor* (CAF) yang mengestimasi jumlah emisi karbon yang berhasil dihindari melalui pemanfaatan energi hijau. Keberhasilan model P2P juga sangat dipengaruhi oleh aspek sosial, terutama tingkat partisipasi komunitas, transparansi

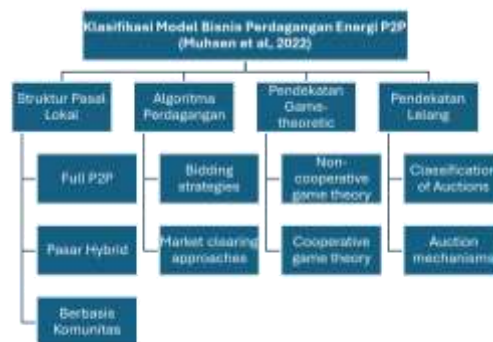
harga, serta kepercayaan terhadap keamanan transaksi digital. Keterbatasan skalabilitas blockchain masih menjadi hambatan, sehingga diperlukan inovasi.

Diskusi Mengenai Usulan Implementasi P2P Energy Trading Di Indonesia

a. Desain Pasar Listrik

Implementasi P2P energy trading di Indonesia memerlukan desain pasar yang adaptif terhadap struktur kelistrikan nasional yang masih berbentuk monopoli vertikal dengan PLN sebagai single buyer. Hambatan utama muncul dari ketiadaan regulasi khusus P2P, tidak tersedianya skema power wheeling, serta keterbatasan infrastruktur distribusi yang dirancang satu arah sehingga rentan terhadap kelebihan beban dan ketidakstabilan tegangan [7], [55], [73]. Namun, pertumbuhan PLTS atap dan kebutuhan elektrifikasi di wilayah terpencil memberikan momentum untuk pengembangan skema desentralisasi energi. Dari sisi teknis, blockchain, *smart contract*, dan IoT menjadi landasan untuk menjamin transparansi, keamanan, serta otomatisasi transaksi [60]. Model yang relevan untuk Indonesia adalah pasar hibrida berbasis komunitas, di mana prosumer bertransaksi dalam lingkup lokal (perumahan atau kawasan industri) dengan agregator sebagai koordinator perdagangan, sementara PLN tetap berfungsi sebagai penyeimbang sistem melalui skema wheeling bertahap. Agregator dapat menyelenggarakan mekanisme lelang internal berbasis *double auction* untuk menentukan *Market Clearing Price* (MCP) yang adil [58]. Pendekatan ini bersifat pragmatis karena tidak membutuhkan perubahan struktural besar pada PLN, memanfaatkan *microgrid* untuk menjawab tantangan geografis, serta membuka peran baru bagi PLN sebagai penyedia jaringan pintar. *Regulatory sandbox* dapat digunakan sebagai kerangka uji coba terbatas sebagaimana diterapkan di Thailand dan Korea Selatan [42].

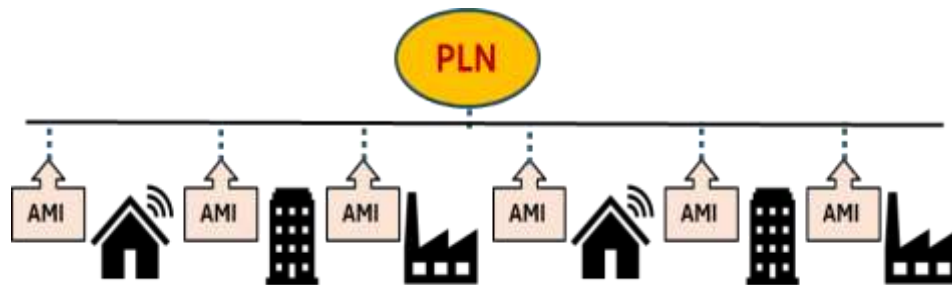
b. Mekanisme Perdagangan



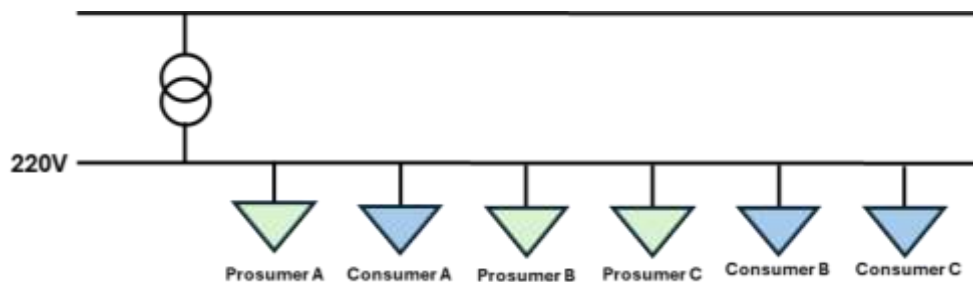
Gambar 3. Klasifikasi model bisnis P2P energy trading

Mekanisme yang paling sesuai untuk implementasi awal P2P di Indonesia adalah PDA karena menawarkan keseimbangan antara efisiensi pasar, transparansi, dan kesederhanaan implementasi. Pada skema ini, prosumer dan konsumen mengajukan penawaran energi dalam interval terjadwal, misalnya setiap 30 hingga 60 menit. Agregator komunitas mengumpulkan seluruh penawaran kemudian menjalankan algoritma pencocokan berbasis clearing function untuk menghasilkan satu MCP. Penerapan *uniform pricing* menjamin bahwa semua transaksi dieksekusi dengan harga seragam, sehingga meminimalisasi diskriminasi harga dan menjaga keadilan pasar [58]. Proses penyelesaian transaksi dapat diotomatisasi menggunakan *smart contract* pada blockchain yang berfungsi sebagai distributed ledger, memastikan integritas data, auditabilitas, serta resistensi terhadap manipulasi [54], [74]. Dari sisi teknis, algoritma PDA lebih sederhana dibanding model berbasis teori permainan non-kooperatif atau *reinforcement learning* yang memerlukan komputasi intensif. PDA tidak bergantung pada optimisasi real-time yang kompleks,

sehingga lebih kompatibel dengan infrastruktur digital Indonesia saat ini. Platform perdagangan dapat dikembangkan menggunakan arsitektur web berbasis cloud yang terhubung dengan HEMS dan perangkat IoT, sehingga memungkinkan agregator memantau penawaran energi, kapasitas baterai, serta status konsumsi secara real-time. Integrasi mekanisme PDA dengan jaringan PLN dilakukan melalui skema *power wheeling* yang memungkinkan surplus energi komunitas dijual ke jaringan, sedangkan kekurangan pasokan dapat dipenuhi dari PLN. Pendekatan ini menjaga kestabilan sistem sekaligus mempertahankan posisi PLN sebagai operator jaringan pintar dan penyedia *balancing service* [1]. Dengan kombinasi antara model pasar hibrida berbasis komunitas dan mekanisme PDA, perdagangan energi P2P di Indonesia dapat diuji dalam *Regulatory sandbox* untuk menguji keandalan algoritma *clearing*, verifikasi teknis transaksi berbasis blockchain, serta interoperabilitas dengan sistem sebelum diadopsi secara luas.



Gambar 4. Usulan skema perdangan energi P2P yang terpusat



Gambar 4. Diagram penggambaran implementasi P2P energy trading pada tegangan rendah

c. Infrastruktur Fisik dan Infrastruktur Virtual

Pengembangan infrastruktur harus diarahkan pada dua jalur utama yaitu pembangunan *microgrid* off-grid berbasis PLTS, ESS, dan meter pintar di wilayah 3T, serta modernisasi jaringan distribusi di wilayah urban melalui *retrofitting*, penerapan AMI, dan aktivasi agregator komunitas. Meter pintar, ESS, *microgrid controller*, dan HEMS menjadi komponen teknis kunci yang harus diintegrasikan untuk membangun prosumer yang cerdas dan mendukung stabilitas pasar P2P. Di sisi virtual, implementasi P2P memerlukan platform digital dengan tingkat keamanan tinggi, protokol komunikasi standar, serta kerangka regulasi yang memungkinkan interoperabilitas dengan sistem PLN. *Regulatory sandbox* dapat menjadi instrumen awal untuk menguji coba desain pasar dan settlement berbasis blockchain. Secara teknis, arsitektur hibrida blockchain sangat relevan, dengan Hyperledger Fabric untuk penyelesaian transaksi internal berkecepatan tinggi dan Ethereum sidechain untuk transparansi harga publik. Standarisasi protokol komunikasi seperti IEC 61850 dan MQTT diperlukan agar perangkat DER, meter pintar, dan HEMS dapat saling terhubung secara real-time. Cybersecurity menjadi aspek krusial, sehingga penerapan standar ISO 27001 dan IEC 62443 perlu diwajibkan agar integritas data dan transaksi terjaga.

d. Kebijakan dan Tata Kelola

Keberhasilan penerapan P2P tidak hanya ditentukan oleh kesiapan teknis tetapi juga oleh desain kebijakan dan tata kelola. UU No. 30/2009 masih menempatkan PLN sebagai pembeli tunggal, sehingga transaksi langsung antar prosumer belum memiliki legitimasi hukum. Regulasi power wheeling juga belum diimplementasikan, padahal hal ini penting untuk membuka akses jaringan bagi transaksi energi desentralisasi. Solusi yang disarankan adalah penerapan *Regulatory sandbox* di bawah Kementerian ESDM yang memungkinkan pengujian P2P di skala komunitas sebelum dilegalkan secara nasional. Selain itu, perlu dibentuk Dewan Tata Kelola P2P yang terdiri atas PLN, regulator, asosiasi prosumer, dan akademisi untuk merancang aturan pasar, mensertifikasi platform digital, dan menyusun *service level agreement* bagi pengelolaan jaringan. Kerangka kebijakan juga perlu mengatur skema time-of-use pricing, perlindungan data, dan standar interoperabilitas antar perangkat energi. Untuk menjamin keamanan dan kepercayaan publik, mekanisme escrow berbasis *smart contract* dapat digunakan dalam penyelesaian transaksi, sementara audit tahunan diperlukan untuk memastikan kepatuhan pada standar keamanan siber dan transparansi harga. Model tata kelola internasional dapat dijadikan referensi, seperti Ofgem di Inggris yang menekankan perlindungan konsumen, Energy Market Authority Singapura yang mengintegrasikan regulator dan operator pasar, serta Energy Commission Malaysia yang fleksibel melalui sandbox.

Kesimpulan dan Rekomendasi

Penelitian ini menegaskan bahwa perdagangan energi P2P menawarkan paradigma baru dalam pengelolaan sistem energi terdistribusi di Indonesia, dengan prosumer sebagai aktor utama. Berdasarkan tinjauan komparatif terhadap praktik di negara-negara seperti Jerman, Inggris, Korea Selatan, Thailand, serta adaptasi best practice dari Malaysia, diusulkan sebuah Model Pasar Hibrida Berbasis Komunitas. Model ini mengintegrasikan desain pasar berbasis aggregator komunitas dengan mekanisme PDA untuk menjamin efisiensi, transparansi, dan kemudahan implementasi. Infrastruktur fisik yang diusulkan meliputi instalasi meter pintar secara bertahap, pengembangan *microgrid* mandiri di wilayah 3T, serta *retrofitting* jaringan distribusi di area urban. Infrastruktur virtual yang direkomendasikan mencakup kombinasi permissioned blockchain seperti Hyperledger Fabric untuk penyelesaian transaksi cepat dan public sidechain seperti Ethereum untuk transparansi harga dan audit publik. Dari sisi regulasi, model ini didukung oleh penerapan *Regulatory sandbox* nasional, pembukaan akses jaringan PLN bagi aggregator, serta pembentukan Dewan Tata Kelola P2P yang melibatkan KESDM, PLN, BPH Migas, asosiasi prosumer, dan akademisi. Model ini dinilai pragmatis karena tidak menuntut reformasi struktural besar pada PLN, sesuai dengan kondisi geografis Indonesia sebagai negara kepulauan, serta memungkinkan pengembangan inovasi teknologi dan peningkatan partisipasi masyarakat seiring peningkatan penetrasi energi terbarukan dan perkembangan digital nasional. Arah riset masa depan perlu diarahkan pada uji coba lapangan melalui pilot project di komunitas *microgrid* untuk menilai keandalan teknis, kelayakan bisnis, dan faktor sosial-ekonomi. Model simulasi stokastik harus dikembangkan guna mengevaluasi sensitivitas harga, variabilitas DER, serta performa PDA pada kondisi beban puncak dan gangguan jaringan. Mekanisme perdagangan dapat dioptimalkan dengan varian lelang seperti continuous double auction dan otomatisasi *smart contract*. Integrasi insentif hijau berbasis tokenisasi kredit karbon perlu dieksplorasi untuk meningkatkan partisipasi prosumer dan konsumen ramah lingkungan. Aspek sosial-regulasi seperti kepercayaan, persepsi risiko, perlindungan data, dan tarif dinamis memerlukan kajian interdisipliner. Selain itu, skalabilitas teknologi blockchain hibrida harus diuji melalui stress-test keamanan siber serta adopsi solusi Layer-2 seperti zk-rollups untuk menekan biaya dan mempercepat transaksi. Peta jalan ini diharapkan membawa P2P energy trading Indonesia dari tahap pilot menuju implementasi nasional.

Daftar Pustaka

- [1] Y. B. Heng, V. K. Ramachandaramurthy, R. Verayiah, and S. Walker, "Developing Peer-to-Peer (P2P) Energy Trading Model for Malaysia: A Review and Proposed Implementation," *Ieee Access*, vol. 10, pp. 33183–33199, 2022, doi: 10.1109/access.2022.3161577.
- [2] T. Sousa, T. Soares, P. Pinson, F. Moret, T. Baroche, and E. Sorin, "Peer-to-Peer and Community-Based Markets: A Comprehensive Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 104, pp. 367–378, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.01.036.
- [3] W. Tushar, T. K. Saha, C. Yuen, D. J. Smith, and H. V Poor, "Peer-to-Peer Trading in Electricity Networks: An Overview," 2020, doi: 10.48550/arxiv.2001.06882.
- [4] M. A. Rahmanta, A. Permana, W. Susanto, E. D. Sadono, I. H. Iksari, and M. A. Muflikhun, "The Feed-in Tariff (FIT) Policy to Improve Renewable Energy Utilization: An Analysis of FIT Implementation in ASEAN Countries From Renewable Energy Growth, Decarbonization, and Investment Perspective," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 12, no. 5, pp. 864–880, 2023, doi: 10.14710/ijred.2023.55929.
- [5] D. Azhgaliyeva and R. Mishra, "Feed-in Tariffs for Financing Renewable Energy in Southeast Asia," *Wiley Interdiscip Rev Energy Environ*, vol. 11, no. 3, 2021, doi: 10.1002/wene.425.
- [6] B. Tao, G. Cao, and T. Sun, "Direct Sourcing From Renewable Energy Under Cost Uncertainty: A Bargaining Approach," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 2022, pp. 1–13, 2022, doi: 10.1155/2022/3588929.
- [7] D. F. Hakam, S. K. Wiyono, and N. Hariyanto, "Competition in Power Generation: Ex-Ante Analysis of Indonesia's Electricity Market," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 24, p. 6741, 2020, doi: 10.3390/en13246741.
- [8] D. Setyawan, "Assessing the Current Indonesia's Electricity Market Arrangements and the Opportunities to Reform," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 3, no. 1, pp. 55–64, 2015, doi: 10.14710/ijred.3.1.55-64.
- [9] U. Khayam *et al.*, "Status of Lighting Technology Application in Indonesia," *Sustainability*, vol. 15, no. 7, p. 6283, 2023, doi: 10.3390/su15076283.
- [10] P. A. A. Pramana, D. F. Hakam, H. B. Tambunan, K. M. Tofani, and K. G. H. Mangunkusumo, "How Are Consumer Perspectives of PV Rooftops and New Business Initiatives in Indonesia's Energy Transition?," *Sustainability*, vol. 16, no. 4, p. 1590, 2024, doi: 10.3390/su16041590.
- [11] Z. Ngadiron, N. H. Radzi, and Z. Yassin, "Generation Revenue Assessment in Malaysia Electricity Supply Industry," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 773–774, pp. 481–485, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.773-774.481.
- [12] A. H. Azman, N. N. A. Tukimat, M. A. Malek, and R. Faizah, "Analysis of Malaysia Electricity Demand and Generation by 2040," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 880, no. 1, p. 012050, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/880/1/012050.
- [13] G. Hochman and C. Tabakis, "The Potential Implications of the Introduction of Bioelectricity in South Korea," *Sustainability*, vol. 12, no. 18, p. 7602, 2020, doi: 10.3390/su12187602.
- [14] W. Hwang and J. Lee, "A CGE Analysis for Quantitative Evaluation of Electricity Market Changes," *Energy Policy*, vol. 83, pp. 69–81, 2015, doi: 10.1016/j.enpol.2015.04.006.
- [15] E. Park, T. Han, T. Kim, S. J. Kwon, and Á. P. d. Pobil, "Economic and Environmental Benefits of Optimized Hibrida Renewable Energy Generation Systems at Jeju National University, South Korea," *Sustainability*, vol. 8, no. 9, p. 877, 2016, doi: 10.3390/su8090877.

- [16] J. C. d. Prado, W. Qiao, L. Qu, and J. R. Agüero, "The Next-Generation Retail Electricity Market in the Context of Distributed Energy Resources: Vision and Integrating Framework," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 3, p. 491, 2019, doi: 10.3390/en12030491.
- [17] M. Klein, A. Ziade, and L. d. Vries, "Aligning Prosumers With the Electricity Wholesale Market – The Impact of Time-Varying Price Signals and Fixed Network Charges on Solar Self-Consumption," *Energy Policy*, vol. 134, p. 110901, 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2019.110901.
- [18] W.-P. Schill, A. Zerrahn, and F. Kunz, "Prosumage of Solar Electricity: Pros, Cons, and the System Perspective," *SSRN Electronic Journal*, 2017, doi: 10.2139/ssrn.2912814.
- [19] I. Muangthai, C. Lewis, and S. J. Lin, "Decoupling Effects and Decomposition Analysis of CO2 Emissions From Thailand's Thermal Power Sector," *Aerosol Air Qual Res*, vol. 14, no. 7, pp. 1929–2938, 2014, doi: 10.4209/aaqr.2014.03.0066.
- [20] P. Eiamchamroonlarp, "Roles of the 2007 Energy Industry Act in Supporting Peer-to-Peer Electricity Trading in Thailand: Issues to Be Addressed by the 2004 Electricity Law of Vietnam," *Vietnamese Journal of Legal Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 44–74, 2022, doi: 10.2478/vjls-2022-0003.
- [21] C. Robinson, "Energy Policy: The Return of the Regulatory State," *Economic Affairs*, vol. 36, no. 1, pp. 33–47, 2016, doi: 10.1111/ecaf.12152.
- [22] N. Xu, X. Gao, S. Chai, M. Niu, and J. Yang, "Leveraging Sanitized Data for Probabilistic Electricity Market Prediction: A Singapore Case Study," *Front Energy Res*, vol. 11, 2023, doi: 10.3389/fenrg.2023.1296957.
- [23] F. Condon, P. Franco, J. M. Martínez, A. M. Eltamaly, Y.-C. Kim, and M. A. Ahmed, "EnergyAuction: IoT-Blockchain Architecture for Local Peer-to-Peer Energy Trading in a Microgrid," *Sustainability*, vol. 15, no. 17, p. 13203, 2023, doi: 10.3390/su151713203.
- [24] J. Gao, Z. Shao, F. Chen, Y. Chen, Y. Lin, and H. Deng, "Distributed Robust Operation Strategy of Multi-microgrid Based on Peer-to-peer Multi-energy Trading," *Iet Energy Systems Integration*, vol. 5, no. 4, pp. 376–392, 2023, doi: 10.1049/esi2.12107.
- [25] P. A. W. Putro, D. I. Sensuse, and W. S. S. Wibowo, "Framework for critical information infrastructure protection in smart government: a case study in Indonesia," *Information and Computer Security*, vol. 32, pp. 112–129, Jan. 2024, doi: 10.1108/ICS-03-2023-0031.
- [26] F. Yusuf, R. F. Sari, P. Yusgiantoro, and T. E. B. Soesilo, "Stakeholders' Perceptions of the Peer-to-Peer Energy Trading Model Using Blockchain Technology in Indonesia," 2024, doi: 10.20944/preprints202408.1838.v1.
- [27] N.-U.-R. Chowdhury, K. Islam, and F. Hasan, "An Efficient Algorithm for Peer-to-Peer Energy Trading Using Blockchain in Microgrid Energy Markets," *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 3, no. 3, 2019, doi: 10.24018/ejece.2019.3.3.80.
- [28] A. Dorri, A. Hill, S. S. Kanhere, R. Jurdak, F. Luo, and Z. Y. Dong, "Peer-to-Peer EnergyTrade: A Distributed Private Energy Trading Platform," 2019, doi: 10.1109/bloc.2019.8751268.
- [29] W. Tushar, C. Yuen, H. Mohsenian-Rad, T. K. Saha, H. Poor, and and Wood, "Transforming Energy Networks via Peer to Peer Energy Trading: Potential of Game Theoretic Approaches," 2020, doi: 10.46855/2020.06.30.15.06.521966.
- [30] Y. H. Yap *et al.*, "A Two-stage Multi Microgrids P2p Energy Trading With Motivational Game-theory: A Case Study in Malaysia," *Iet Renewable Power Generation*, vol. 15, no. 12, pp. 2615–2628, 2021, doi: 10.1049/rpg2.12205.

- [31] C. Fan, H. Khazaei, and P. Musilek, "BPET: A Unified Blockchain-Based Framework for Peer-to-Peer Energy Trading," *Future Internet*, vol. 16, no. 5, p. 162, 2024, doi: 10.3390/fi16050162.
- [32] J.-G. Kim and B. Lee, "Automatic P2P Energy Trading Model Based on Reinforcement Learning Using Long Short-Term Delayed Reward," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 20, p. 5359, 2020, doi: 10.3390/en13205359.
- [33] L. Kharatovi, R. Gantassi, Z. Masood, and Y. Choi, "A Multi-Objective Optimization Framework for Peer-to-Peer Energy Trading in South Korea's Tiered Pricing System," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 23, p. 11071, 2024, doi: 10.3390/app142311071.
- [34] D. Wang and Y. He, "Re-Imagining Trade Policy and Energy Efficiency: Groundbreaking Pathways to Strengthen Environmental Sustainability in South Korea," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 20, p. 9443, 2024, doi: 10.3390/app14209443.
- [35] Ü. Cali and O. Çakır, "Energy Policy Instruments for Distributed Ledger Technology Empowered Peer-to-Peer Local Energy Markets," *Ieee Access*, vol. 7, pp. 82888–82900, 2019, doi: 10.1109/access.2019.2923906.
- [36] A. Chiarini and L. Compagnucci, "Blockchain, Data Protection and P2P Energy Trading: A Review on Legal and Economic Challenges," *Sustainability*, vol. 14, no. 23, p. 16305, 2022, doi: 10.3390/su142316305.
- [37] A. Meeuw *et al.*, "Implementing a Blockchain-Based Local Energy Market: Insights on Communication and Scalability," *Comput Commun*, vol. 160, pp. 158–171, 2020, doi: 10.1016/j.comcom.2020.04.038.
- [38] V. Mohan *et al.*, "Realistic Energy Commitments in Peer-to-Peer Transactive Market With Risk Adjusted Prosumer Welfare Maximization," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 124, p. 106377, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106377.
- [39] A. Schneiders and D. Shipworth, "Community Energy Groups: Can They Shield Consumers From the Risks of Using Blockchain for Peer-to-Peer Energy Trading?," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 12, p. 3569, 2021, doi: 10.3390/en14123569.
- [40] F. Plewnia and E. Guenther, "The Transition Value of Business Models for a Sustainable Energy System: The Case of Virtual Peer-to-Peer Energy Communities," *Organ Environ*, vol. 34, no. 3, pp. 479–503, 2020, doi: 10.1177/1086026620932630.
- [41] A. Hanari and M. Baysal, "The Importance of Classification in Reducing the Congestion Price in Peerto-Peer Energy Trading," *International Conference on Contemporary Academic Research*, vol. 1, pp. 146–150, 2023, doi: 10.59287/iccar.768.
- [42] S. Junlakarn, P. Kokchang, and K. Audomvongseree, "Drivers and Challenges of Peer-to-Peer Energy Trading Development in Thailand," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 3, p. 1229, 2022, doi: 10.3390/en15031229.
- [43] A. Leelasantitham, T. Wongsamerchue, and Y. Sukamongkol, "Economic Pricing in Peer-to-Peer Electrical Trading for a Sustainable Electricity Supply Chain Industry in Thailand," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 5, p. 1220, 2024, doi: 10.3390/en17051220.
- [44] T. Morstyn and M. McCulloch, "Multiclass Energy Management for Peer-to-Peer Energy Trading Driven by Prosumer Preferences," *Ieee Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 5, pp. 4005–4014, 2019, doi: 10.1109/tpwrs.2018.2834472.
- [45] A. Pinyo, A. Bangviwat, C. Menke, and A. Monti, "Decentralized P2P Electricity Trading Model for Thailand," *Sensors*, vol. 21, no. 21, p. 7413, 2021, doi: 10.3390/s21217413.
- [46] P. Wongthongtham, D. Marrable, B. Abu-Salih, X. Liu, and G. M. Morrison, "Blockchain-Enabled Peer-to-Peer Energy Trading," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 94, p. 107299, 2021, doi: 10.1016/j.compeleceng.2021.107299.

- [47] M. Jenkins and I. Kockar, "Impact of P2P Trading on Distributed Generation Curtailment in Constrained Distribution Networks," *Electric Power Systems Research*, vol. 189, p. 106666, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106666.
- [48] O. Jogunola *et al.*, "Peer-to-Peer Local Energy Market: Opportunities, Barriers, Security, and Implementation Options," *Ieee Access*, vol. 12, pp. 37873–37890, 2024, doi: 10.1109/access.2024.3375525.
- [49] S. Larbwisuthisaroj and S. Chaitusaney, "A Method for Determining the Maximum P2P Penetration Considering Stakeholder Benefits," *Iet Generation Transmission & Distribution*, vol. 18, no. 1, pp. 145–158, 2023, doi: 10.1049/gtd2.13078.
- [50] Y. Zahraoui, T. Korötko, A. Rosin, T. E. K. Zidane, and S. Mekhilef, "A Real-Time Simulation for P2P Energy Trading Using a Distributed Algorithm," *Ieee Access*, vol. 12, pp. 44135–44146, 2024, doi: 10.1109/access.2024.3369899.
- [51] A. Kumari *et al.*, "Blockchain-Based Peer-to-Peer Transactive Energy Management Scheme for Smart Grid System," *Sensors*, vol. 22, no. 13, p. 4826, 2022, doi: 10.3390/s22134826.
- [52] H. Liu, Y. Zhang, S. Zheng, and Y. Li, "Electric Vehicle Power Trading Mechanism Based on Blockchain and *Smart contract* in V2G Network," *Ieee Access*, vol. 7, pp. 160546–160558, 2019, doi: 10.1109/access.2019.2951057.
- [53] J. Song, E. S. Kang, H. W. Shin, and J. W. Jang, "A *Smart contract*-Based P2P Energy Trading System With Dynamic Pricing on Ethereum Blockchain," *Sensors*, vol. 21, no. 6, p. 1985, 2021, doi: 10.3390/s21061985.
- [54] M. Khorasany, Y. Mishra, and G. Ledwich, "Design of Auction-based Approach for Market Clearing in Peer-to-peer Market Platform," *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 18, pp. 4813–4818, 2019, doi: 10.1049/joe.2018.9313.
- [55] E. Sorin, L. Bobo, and P. Pinson, "Consensus-Based Approach to Peer-to-Peer Electricity Markets With Product Differentiation," *Ieee Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 2, pp. 994–1004, 2019, doi: 10.1109/tpwrs.2018.2872880.
- [56] J. Guerrero, A. C. Chapman, and G. Verbič, "Decentralized P2P Energy Trading Under Network Constraints in a Low-Voltage Network," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 10, no. 5, pp. 5163–5173, 2019, doi: 10.1109/tsg.2018.2878445.
- [57] R. Khalid, N. Javaid, A. Almogren, M. U. Javed, S. Javaid, and M. Zuair, "A Blockchain-Based Load Balancing in Decentralized Hibrida P2P Energy Trading Market in Smart Grid," *Ieee Access*, vol. 8, pp. 47047–47062, 2020, doi: 10.1109/access.2020.2979051.
- [58] H. Muhsen, A. Allahham, A. Al-halhouli, M. Al-mahmodi, A. Alkhraibat, and M. Hamdan, "Business Model of Peer-to-Peer Energy Trading: A Review of Literature," *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 1616, vol. 14, no. 3, p. 1616, Jan. 2022, doi: 10.3390/SU14031616.
- [59] A. M. Eltamaly and M. A. Ahmed, "Performance Evaluation of Communication Infrastructure for Peer-to-Peer Energy Trading in Community *Microgrids*," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 13, p. 5116, 2023, doi: 10.3390/en16135116.
- [60] M. Fell, A. Schneiders, and D. Shipworth, "Consumer Demand for Blockchain-Enabled Peer-to-Peer Electricity Trading in the United Kingdom: An Online Survey Experiment," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 20, p. 3913, 2019, doi: 10.3390/en12203913.
- [61] T. Morstyn, N. Farrell, S. Darby, and M. McCulloch, "Using Peer-to-Peer Energy-Trading Platforms to Incentivize Prosumers to Form Federated Power Plants," *Nat Energy*, vol. 3, no. 2, pp. 94–101, 2018, doi: 10.1038/s41560-017-0075-y.
- [62] A. Paudel, L. P. M. I. Sampath, J. Yang, and H. B. Gooi, "Peer-to-Peer Energy Trading in Smart Grid Considering Power Losses and Network Fees," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 11, no. 6, pp. 4727–4737, 2020, doi: 10.1109/tsg.2020.2997956.

- [63] T. Baroche, P. Pinson, R. L. G. Latimier, and H. B. Ahmed, "Exogenous Cost Allocation in Peer-to-Peer Electricity Markets," *Ieee Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 4, pp. 2553–2564, 2019, doi: 10.1109/tpwrs.2019.2896654.
- [64] K. Pumphrey, S. Walker, M. Andoni, and V. Robu, "Green Hope or Red Herring? Examining Consumer Perceptions of Peer-to-Peer Energy Trading in the United Kingdom," *Energy Res Soc Sci*, vol. 68, p. 101603, 2020, doi: 10.1016/j.erss.2020.101603.
- [65] S. d. Diego *et al.*, "A Peer-to-Peer Verifiable and Secure Energy Trading Framework Based on Blockchain Technology," pp. 241–247, 2021, doi: 10.1109/worlds451998.2021.9514028.
- [66] S. Wilkinson, K. Hojčková, C. Eon, G. M. Morrison, and B. A. Sandén, "Is Peer-to-Peer Electricity Trading Empowering Users? Evidence on Motivations and Roles in a Prosumer Business Model Trial in Australia," *Energy Res Soc Sci*, vol. 66, p. 101500, 2020, doi: 10.1016/j.erss.2020.101500.
- [67] K. Anoh, S. Maharjan, A. Ikpehai, Y. Zhang, and B. Adebisi, "Energy Peer-to-Peer Trading in Virtual *Microgrids* in Smart Grids: A Teori permainan Approach," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 11, no. 2, pp. 1264–1275, 2020, doi: 10.1109/tsg.2019.2934830.
- [68] J. A. Abdella and K. Shuaib, "Peer to Peer Distributed Energy Trading in Smart Grids: A Survey," *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 6, p. 1560, 2018, doi: 10.3390/en11061560.
- [69] V. H. Nguyen, Y. Bésanger, Q. T. Tran, and M. T. Le, "On the Applicability of Distributed Ledger Architectures to Peer-to-Peer Energy Trading Framework," 2018, doi: 10.1109/eeeic.2018.8494446.
- [70] M. I. Azim, W. Tushar, and T. K. Saha, "Coalition Graph Game-Based P2P Energy Trading With Local Voltage Management," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 12, no. 5, pp. 4389–4402, 2021, doi: 10.1109/tsg.2021.3070160.
- [71] R. Álvaro-Hermana, J. Fraile-Ardanuy, P. J. Zufiria, L. Knapen, and D. Janssens, "Peer to Peer Energy Trading With Electric Vehicles," *Ieee Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 8, no. 3, pp. 33–44, 2016, doi: 10.1109/mits.2016.2573178.
- [72] Z. Li, J. Kang, R. Yu, D. Ye, Q. Deng, and Y. Zhang, "Consortium Blockchain for Secure Energy Trading in Industrial Internet of Things," *IEEE Trans Industr Inform*, pp. 1–1, 2017, doi: 10.1109/tii.2017.2786307.
- [73] H. B. Tambunan *et al.*, "The Challenges and Opportunities of Renewable Energy Source (RES) Penetration in Indonesia: Case Study of Java-Bali Power System," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 22, p. 5903, 2020, doi: 10.3390/en13225903.
- [74] Y. Jin, J. Choi, and D.-J. Won, "Pricing and Operation Strategy for Peer-to-Peer Energy Trading Using Distribution System Usage Charge and Game Theoretic Model," *Ieee Access*, vol. 8, pp. 137720–137730, 2020, doi: 10.1109/access.2020.3011400.