

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Energi sebagai komoditas komersial paling penting dengan pangsa terbesar dalam perdagangan dunia, telah terbukti memiliki peran yang semakin penting dalam pertumbuhan ekonomi banyak negara (Moghaddasi dkk. 2016). Permintaan energi dunia tumbuh cepat karena ledakan populasi dan kemajuan teknologi (Kannan dkk. 2016). Kurun waktu 20 tahun terakhir, konsumsi energi dunia telah meningkat tajam (40%), dan diperkirakan akan terus meningkat sepertiga pada periode 2035 (Wang dkk. 2018). Selama tiga dekade terakhir, konsumsi energi primer global meningkat pada tingkat yang mengkhawatirkan. Saat ini, konsumsi energi dunia mencapai 10 terawatt (TW) per tahun, dan pada tahun 2050 diproyeksikan sekitar 30 TW (Yilmaz dkk. 2015). Akselerasi konsumsi energi global pada 2017 mencapai kenaikan 2,3% lebih tinggi dari tahun sebelumnya yang mengalami kenaikan 1,1% (International Energy Agency 2019).

Kenaikan konsumsi energi primer global, diikuti pula konsumsi energi listrik dunia mengalami peningkatan dengan cepat pada tingkat yang lebih cepat dari pada konsumsi energi. Konsumsi listrik dunia 2016 mencapai 21.815 TWh, 2,8% lebih tinggi dari 2015. Pada 2017, total konsumsi listrik final dunia mencapai 21.372 TWh, 2,6% lebih tinggi dari 2016 (The International Energy Agency, 2018). Sejak tahun 2000, kapasitas pembangkit listrik tenaga batu bara telah tumbuh hampir 900 gigawatt (GW), tetapi penambahan bersih dari 2017 hingga 2040 diperkirakan hanya mencapai hanya 400 GW. Konsumsi energi final global 2016 bersumber dari fosil mencapai 79,5% dan pertumbuhan selama 10 tahun sebesar 1,6% (REN 21, 2017).

Emisi karbon dioksida (CO₂) global dari pembakaran bahan bakar fosil dan proses industri dalam 40 tahun terakhir meningkat dari 16.9 Gt menjadi 35,5 Gt dalam tahun 2014, dengan pertumbuhan tahunan rata-rata 1,8 % (Jiang dkk. 2016). Penggunaan bahan bakar fosil banyak menghadapi masalah lingkungan, seperti peningkatan konsentrasi karbon dioksida atmosfer dari emisi gas rumah kaca, keamanan energi lingkungan teknik produksi, harga energi yang fluktuatif, dan menipisnya cadangan bahan bakar berbasis karbon (Nguyen dkk. 2010; Choi dkk. 2011; Marif dkk. 2018). Dalam konteks konsumsi energi global, emisi CO₂ bertumbuh dengan sektor listrik menyumbang hampir dua pertiga pertumbuhan emisi (IEA, 2017). Karena itu, kebutuhan untuk mengurangi emisi CO₂ dari produksi energi dan kegiatan industri telah menjadi perhatian di seluruh penjuru dunia. Penggunaan energi sejauh ini merupakan sumber emisi gas rumah kaca terbesar dari aktivitas manusia. Sekitar dua pertiga dari emisi gas rumah kaca global terkait dengan pembakaran bahan bakar fosil untuk energi yang akan digunakan untuk pemanas, listrik, transportasi dan industri. Karbon dioksida merupakan gas rumah kaca utama dan emisinya terutama berasal dari pembakaran bahan bakar fosil. Penggunaan dan produksi energi berbahan bakar fosil menguatkan gas rumah kaca dan berdampak terjadi pemanasan global.

Pada bagian lain, permintaan energi Nasional terutama energi listrik mengalami peningkatan permintaan. Kapasitas terpasang pembangkit meningkat, dari sebesar 37,29 GW tahun 2000 menjadi 55,53 GW pada tahun 2015 (ESDM 2016). Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi memproyeksikan permintaan tenaga listrik akan meningkat dari 147 TWh pada tahun 2010 menjadi 892 TWh pada tahun 2030, atau tumbuh rata-rata sebesar 9,4% per tahun. Sementara itu, proyeksi Dewan Energi Nasional permintaan listrik Indonesia mencapai 933 TWh pada tahun 2030 (Sugiyono, 2012). Menurut Kementerian ESDM (2018)

pertumbuhan permintaan listrik tahun 2025 diperkirakan mencapai 381,7 TWh dan 1.621,7 TWh tahun 2050, dengan tingkat pertumbuhan permintaan listrik sekitar 6,3% per tahun. Dalam konteks penyediaan tenaga listrik di Indonesia selama satu dekade terakhir penggunaan energi fosil masih mendominasi. Energi fosil mencapai 88% dari total pasokan listrik, porsi batubara mencapai 60%, dan diikuti oleh sumber bahan bakar fosil lain seperti minyak dan gas bumi. Kapasitas pembangkit listrik fosil masih tumbuh 4,5 kali dibandingkan pembangkit energi terbarukan pada periode 2014-2017 (Adiatma dan Arinaldo, 2018).

Emisi gas rumah kaca secara Nasional meningkat hingga hampir tiga kali lipat antara tahun 1990 dan 2015, dan laju peningkatannya diperkirakan akan semakin bertambah hingga tahun 2030 (IESR, 2018). Dari sektor energi, emisi gas rumah kaca tahun 2015 mencapai 261,89 juta ton CO₂ dengan peningkatan rata-rata sebesar 2,43% per tahun. Penyumbang emisi terbesar antara lain industri produsen energi (47,81%), transportasi (24,71%), industri manufaktur dan konstruksi (14,74%), sektor lainnya (6,96%). Menurut kementerian ESDM (2017) penghasil emisi terbesar pada industri produsen energi adalah pembangkitan energi listrik. Data IESR (2018) emisi CO₂ dari sektor energi tahun 2017 mencapai 484 MtCO₂, sektor-sektor yang menggunakan energi merupakan penyumbang terbesar emisi CO₂ dari total emisi gas rumah kaca nasional. Sepanjang tahun 2012-2017 peningkatan emisi CO₂ sebesar 18% yang disebabkan karena meningkatnya emisi dari pembangkitan listrik, sektor industri, dan sektor transportasi.

Peran penting energi matahari yang bebas emisi karbon untuk menghasilkan energi listrik akhir-akhir ini telah menjadi perhatian. Energi matahari didefinisikan sebagai radiasi matahari yang dieksploitasi untuk produksi air panas dan pembangkit listrik (IEA, 2007). Energi matahari sebagai komponen dari portofolio pasokan energi, berkontribusi pada

keamanan pasokan energi dan memberikan peluang untuk mitigasi gas rumah kaca. Energi matahari bebas emisi karbon untuk menghasilkan listrik telah berkembang pesat dalam rangka meningkatkan produksi energi listrik. Energi bersih seperti itu sangat penting bagi dunia, terutama pada saat harga bahan bakar fosil tinggi dan situasi kritis di atmosfer akibat penggunaan bahan bakar fosil (Khatib dkk. 2011). Energi matahari tersedia berlimpah, bersih dari semua sumber daya energi terbarukan hingga saat ini, bersifat universal, tidak bersuara dan tidak berpolusi (Parida dkk. 2011; Hasan dkk. 2016; Rodríguez-amigo dkk. 2017). Energi matahari yang diterima oleh bumi lebih dari 15.000 kali konsumsi energi komersial dunia dan lebih dari 100 kali cadangan batubara, gas, dan minyak yang dikenal dunia, tersedia pada siang hari, gratis dan tanpa kendala (Gupta dan Anand, 2013).

Secara umum, teknologi energi matahari dapat dikelompokkan menjadi dua kategori: (i) teknologi fotovoltaik dan (ii) teknologi fototermik atau surya termal (Zhang dan Smith, 2008; Chowdhury 2016; Shukla dkk. 2016; Kabir dkk. 2018; Raina dan Sinha, 2019). Teknologi fotovoltaik mengkonversi langsung cahaya matahari menjadi listrik melalui perangkat semikonduktor yang disebut sel surya, sedangkan teknologi surya termal memanfaatkan panas dari radiasi matahari dengan menggunakan alat pengumpul panas atau yang biasa disebut kolektor surya. Pengembangan energi matahari sebagai energi listrik yang dikerjakan dalam penelitian ini memfokuskan diri pada energi listrik yang dihasilkan dari tenaga matahari menggunakan teknologi fotovoltaik. Penelitian ini dimotivasi oleh setidaknya empat untai *literature* : (i) iradiasi matahari yang mencapai permukaan bumi dapat dipanen sebagai energi listrik; (ii) sebagian besar wilayah Provinsi di Indonesai memperoleh energi matahari dalam jumlah besar karena letak geografis yang berada pada garis Katulistiwa; (iii) area permukaan atas atap bangunan (*rooftop*) dapat menangkap dan mengubah iradiasi matahari menjadi listrik

dengan menggunakan teknologi fotovoltaik, dan (iv) energi listrik bersumber dari radiasi matahari berpeluang dapat mereduksi atau memitigasi karbon dioksida (CO₂) di atmosfer.

Pertama, setiap tahun matahari menyinari daratan bumi setara dengan 19 triliun ton setara minyak (toe), sebagian kecil dari energi ini dapat memenuhi kebutuhan energi dunia (WEC, 2001). Hampir empat juta eksajoule (1 EJ = 10¹⁸J) energi matahari mencapai bumi setiap tahun, sekitar 5×10⁴ EJ diklaim mudah dipanen (Kabir dkk. 2018). Energi matahari diterima dari sinar matahari yang mencapai permukaan bumi dan biasanya disebut sebagai iradiasi matahari, insolasi atau paparan matahari. Potensi intensitas radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi dapat diestimasi dengan menggunakan parameter meteorologis dan geografis (Yadav dan Chandel, 2014). Radiasi matahari dapat dikonversi menjadi listrik dengan teknologi fotovoltaik. Sel fotovoltaik menghasilkan listrik dengan menyerap foton dan melepaskan elektron yang dapat ditangkap dalam bentuk arus listrik (Knier 2011).

Kedua, Provinsi Jawa Tengah memiliki wilayah terletak antara 5°40' dan 8°30'LS dan antara 108°30' dan 111°30'BT (BPS, 2018). Secara geografis posisi wilayah berada pada daerah ekuator sehingga memiliki iklim tropis. Secara administrasi terbagi menjadi 29 wilayah kabupaten dan 6 wilayah kota. Menurut BMKG (2018) penyebaran penyinaran matahari tergolong merata di semua wilayah dengan intensitas radiasi per hari sekitar 3,5 kWh/m² sampai dengan 4,67 kWh/m². Sementara IESR dan ESDM (2019) menyatakan potensi energi surya mencapai 4,05kWh/kWp per hari, di atas rata-rata Indonesia (3,75kWh/kWp). Pemerintah Provinsi Jawa Tengah memiliki komitmen dan rencana mengembangkan energi bersih dengan memanfaatkan energi surya. Dalam konteks ini pengembangan energi surya menjadi salah satu bagian rencana strategis Provinsi Jawa Tengah sesuai dengan yang tertuang dalam Peraturan Daerah Provinsi Jawa Tengah Nomor 12 tahun 2018 tentang Rencana Energi

Daerah yang merupakan turunan dari Peraturan Presiden Nomor 22 tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional.

Ketiga, secara garis besar penggunaan lahan wilayah Provinsi Jawa Tengah untuk permukiman atau perkarangan mencapai 23,7 % dari total luas 32.800,69 km², lahan kebun sebesar 27,5% dan 48,8% berupa lahan lainnya (BPS 2017). Bangunan-bangunan gedung yang berdiri di berbagai wilayah administrasi Provinsi Jawa Tengah diperkirakan akan terkena paparan sinar matahari. Area atas atap bangunan adalah permukaan yang berpotensi menangkap intensitas penyinaran matahari untuk membangkitkan listrik sistem fotovoltaiik. Data BPS (2018) jumlah penduduk 34.718.204 jiwa dengan kepadatan 1.058,46 jiwa/km². Berdasar sensus penduduk 2010 di seluruh wilayah jumlah rumah sebanyak 8.939.575, tersebar dalam wilayah kota madia sebanyak 625.882 rumah dan sekitar 8.313.693 rumah tersebar dalam wilayah kabupaten. Menurut IESR, Jawa Tengah memiliki potensi sekitar 6,9 MWp *rooftop* solar pada bangunan milik Pemerintah Provinsi Jawa Tengah, Pemerintah Kota Semarang, dan bangunan Bupati/Wali kota di wilayah Jawa Tengah. Perhitungan potensi ini belum memasukkan bangunan publik lainnya (Dinas ESDM, 2019).

Keempat, kebutuhan untuk mengurangi karbon dioksida (CO₂) dari produksi energi dan kegiatan industri telah menjadi perhatian dunia. Menurut IEA (2011) Indonesia menandatangani Protokol Kyoto untuk menurunkan emisi global. Pemerintah Indonesia menyadari bahwa penanganan perubahan iklim merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari tantangan pembangunan global dan oleh sebab itu pemerintah Indonesia berperan aktif dalam berbagai kerjasama internasional yang terkait. Dengan komitmen ini, target nasional untuk menurunkan emisi gas rumah kaca hingga 29% dari kondisi *business as usual* di tahun 2030 dengan usaha sendiri dan lebih jauh 41% dengan bantuan internasional.

Secara global, penggunaan energi sejauh ini merupakan sumber emisi gas rumah kaca terbesar dari aktivitas manusia. Sekitar dua pertiga dari emisi gas rumah kaca global terkait dengan pembakaran bahan bakar fosil untuk energi yang akan digunakan untuk pemanas, listrik, transportasi dan industri. Peningkatan perubahan iklim menjadikan energi matahari sebagai topik penelitian yang sangat penting. Penggunaan teknologi fotovoltaik dapat menjadi sumber daya nol emisi, dipandang sebagai teknologi mitigasi perubahan iklim utama (Jacques dkk. 2014, Amin dkk. 2016). Sementara berdasar laporan studi IPCC (2007) dan WEC (2004) generator listrik fotovoltaik rata-rata berpotensi mengalihkan sekitar 58 ton CO₂ per GWh. Studi di California, melaporkan pemasangan 113.533 energi surya rumah tangga telah mengurangi 696.544 metrik ton emisi CO₂. Studi di Taiwan (2008) mengestimasi faktor emisi 0,636 kg CO₂/kWh secara nasional, mampu mengalihkan sekitar 20,9 juta ton emisi CO₂ per tahun dari energi potensial 36,1 TWh generator fotovoltaik tenaga surya. Aksi penurunan gas rumah kaca melalui pembangkitan listrik fotovoltaik kapasitas 46 TWh dalam tahun 2018 dilakukan Pemerintah Jerman diprediksi dapat mengalihkan emisi sekitar 28 Mio.tCO₂e (ISE, 2019).

B. Perumusan Masalah

Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang tersebar di seluruh wilayah. Potensi energi terbarukan untuk ketenagalistrikan mencapai 443 GW, dan secara khusus potensi tenaga surya memiliki porsi terbesar, lebih dari 207 GW (KESDM, 2017). Meskipun demikian, dibandingkan dengan negara-negara tetangga, pemanfaatan energi matahari Indonesia sangat jauh tertinggal (Adiatma dan Arinaldo, 2018). Dalam Rencana Umum Energi Daerah (RUED) 34 provinsi target Nasional tahun 2025 kapasitas energi terbarukan dicanangkan sebesar 47.658 MW, dengan proporsi pembangkit listrik tenaga surya 7557,5 MW (IESR, 2019). Namun

sampai saat ini untuk Indonesia, peta energi matahari diberbagai lokasi belum disusun (Rumbayan dkk. 2012). Dalam konteks potensi energi terbarukan, Peraturan Daerah Provinsi Jawa Tengah Nomer 12 Tahun 2018 tersirat bahwa pembangunan pembangkit listrik tenaga surya atap telah menjadi bagian dari komitmen. Pada bagain lain untuk mewujudkan komitmen tersebut telah dicanangkan target bauran energi baru dan terbarukan mencapai sebesar 21,32 persen di tahun 2025. Meskipun demikian dari data Kementrian ESDM (2017) kapasitas terpasang khusus untuk pembangkitan listrik tenaga surya di Jawa Tengah baru mencapai sekitar 784 kWp. Data ESDM (2020) kapasitas terpasang bertambah 2.919 kWp dari pembangunan surya atap pihak Industri . Potensi energi terbarukan Jawa Tengah mencapai 8.753 MW, tahun 2028 dicanangkan kapasitas terpasang mencapai 160 MW (ESDM, 2017).

Kebutuhan energi listrik setiap tahun di Provinsi Jawa Tengah terus meningkat. Ditinjau dari jumlah pelanggan di tahun 2017 sebanyak 9.603.887, dengan kelompok pelanggan Rumah Tangga 8.910.045. Kurun waktu 2 tahun, tahun 2019 meningkat sebanyak 11.652.121 dan kelompok pelanggan Rumah Tangga mencapai 10.768.909 (BPS Jateng, 2020). Sementara itu, kapasitas daya listrik Nasional terpasang sekitar 62.832,7 MW, dengan pembangkit listrik berbahan bakar fosil masih mendominasi mencapai 90,45% dan non-fosil sekitar 9,55 %. Komposisi kapasitas daya listrik terpasang di Pulau Jawa sebesar 40.174,66 MW (63,9%) dan Luar Jawa 21.632,99 MW(34,4%). Konsumsi energi Nasional sebesar 245.518,17GWh, dengan komposisi 70,7% berada di Pulau Jawa dan sekitar 29,3 % Luar Jawa. Komposisi konsumsi energi listrik untuk Jawa Tengah mencapai 24.750,62 GWh atau sekitar 14,26% dari total komsumsi energi listrik Pulau Jawa dan sekitar 10,1% dari total konsumsi energi listrik Nasional (Statistik PLN, 2019).

Emisi gas rumah kaca (GRK) Nasional tahun 2017, sektor yang memberikan kontribusi terbesar terhadap emisi GRK adalah sektor Energi sebesar 49%, diikuti oleh sektor kehutanan dan kebakaran gambut 25% dan pertanian 11%. (KLHK, 2019). Tingkat emisi CO₂(e) di Jawa Tengah, tahun 2008 mencapai 29.418.849 ton CO₂(e), penyumbang emisi sektor energi 23.965.516 ton CO₂(e) atau sekitar 81,4%. Jumlah emisi dalam kurun 2 tahun telah mencapai 39.886.167 ton CO₂(e) meningkat sekitar 35,6 % pada tahun 2010. Rencana aksi daerah GRK Provinsi Jawa Tengah merencanakan menurunkan emisi GRK sebesar 5,7 juta ton CO₂(e) atau sekitar 17,33 % dari perkiraan GRK 29,97 juta ton CO₂(e) pada tahun 2020 (Pemerintah Provinsi Jawa Tengah, 2012).

Mitigasi terhadap perubahan iklim merupakan tantangan utama di berbagai negara dalam abad ke-21. Upaya untuk mengurangi emisi CO₂ agar berhasil membatasi pemanasan global, sangat perlu mengembangkan sistem kelistrikan menggunakan sumber energi bersih dari matahari. Sumber energi baru, aman, bersih dan ekonomis diperlukan sebagai sumber energi berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan negara berkembang dan maju. Dari kajian Kementerian ESDM (2017) memperkirakan pembangkitan listrik dari sumber energi matahari mampu mengalihkan emisi CO₂ dengan faktor emisi sekitar 0,87 ton CO₂ per MWh. Kemudian dalam konteks Rencana Aksi Daerah (RAD), hingga akhir tahun 2020 Pemerintah Provinsi Jawa Tengah memiliki target bisa menurunkan laju emisi gas rumah kaca (GRK) sebanyak 12,64% (Pergub 43, 2018).

Teknologi tenaga matahari bergantung pada cuaca membutuhkan peta iradiasi suatu wilayah agar mengetahui potensi penyinaran matahari di berbagai lokasi. Iradiasi matahari digunakan pada tahap awal untuk memperkirakan potensi energi terbarukan. Peta iradiasi matahari dapat memberikan informasi yang berguna tentang profil sumber energi matahari

sebagai masukan untuk implementasi sistem energi surya. Intensitas iradiasi matahari adalah informasi minimum yang pada umumnya diperlukan sebagai parameter awal untuk mengembangkan sistem energi surya (Mubiru 2008, Gungor dan Yildirim, 2012, Rumbayan dkk. 2012). Iradiasi merepresentasikan laju di mana energi radiasi terjadi pada permukaan per satuan luas permukaan. Iradiasi, dinyatakan dalam Joule/m^2 atau kWh/m^2 , adalah energi datang per satuan luas di permukaan, yang diperoleh dari integrasi iradiasi selama waktu tertentu, biasanya satu jam atau satu hari. Insolasi adalah istilah yang berlaku khusus untuk iradiasi energi matahari (Sarbu dan Sebarchievici, 2017).

Penelitian ini akan mengkaji pengembangan energi matahari menjadi energi listrik pada semua wilayah administrasi Provinsi Jawa Tengah. Potensi energi listrik bersumber dari sistem fotovoltaik atap permukiman dan pengalihan karbon dioksida (CO_2) merupakan bagian kajian utama dalam penelitian. Seperti dikemukakan di awal Provinsi Jawa Tengah berkontribusi secara Nasional dalam penggunaan energi listrik berbasis bahan bakar fosil yang menghasilkan emisi karbon dioksida (CO_2). Peningkatan emisi CO_2 sebagai unsur utama gas rumah kaca (GRK) berdampak negatif terhadap kondisi lingkungan suatu wilayah. Namun dari aspek faktor geografis Provinsi Jawa Tengah memiliki potensi energi matahari di semua wilayah yang dapat diberdayakan sebagai sumber listrik yang berkelanjutan. Karena itu, wilayah Provinsi Jawa Tengah menjadi alternatif area studi dalam penelitian. Selain itu ada pertimbangan aspek regulasi sudah tersedia melalui Peraturan Daerah Provinsi Jawa Tengah 2018. Adapun yang menjadi target utama penyelidikan adalah untuk mendapatkan panen potensi produksi listrik dari atap fotovoltaik permukiman, mitigasi karbon dioksida dari sistem energi listrik bersumber dari matahari dan peta iradiasi matahari. Fokus penyelidikan pada pengembangan sistem fotovoltaik atap permukiman di semua wilayah Provinsi Jawa Tengah mencakup wilayah 29

Kabupaten dan 6 Kota. Penelitian ini sangat penting mengingat bagaimanapun energi listrik memiliki peran yang sangat vital dan strategis bagi ketahanan dan kemandirian energi daerah. Merujuk pada permasalahan dan pencapaian target penelitian muncul sejumlah pertanyaan yang menjadi fokus perhatian dalam penyelidikan sebagai berikut:

1. Seberapa besar intensitas iradiasi matahari atau insolasi yang melintasi wilayah 29 Kabupaten dan 6 Kota di Provinsi Jawa Tengah?
2. Bagaimana profil peta iradiasi matahari atau insolasi wilayah 29 Kabupaten dan 6 Kota di Provinsi Jawa Tengah ?
3. Seberapa besar area atap permukiman yang tersedia untuk utilisasi modul fotovoltaik yang mencakup wilayah 29 Kabupaten dan 6 Kota di Provinsi Jawa Tengah ?
4. Seberapa besar potensi produksi listrik yang dapat dipanen dari sistem fotovoltaik atap permukiman wilayah 29 Kabupaten dan 6 Kota di Provinsi Jawa Tengah ?
5. Seberapa besar potensi mitigasi karbon dioksida (CO₂) dari produksi listrik fotovoltaik atap permukiman wilayah 29 Kabupaten dan 6 Kota di Provinsi Jawa Tengah ?

Urgensi penelitian pengembangan energi matahari sebagai sumber listrik terdapat beberapa pertimbangan. Bagi masyarakat Jawa Tengah memanen potensi listrik bersumber energi matahari dirasa penting sebagai bagian pemberdayaan energi bersih dari lingkungan permukiman. Dalam konteks ketenagalistrikan Indonesia, pengembangan energi matahari sebagai sumber listrik sebagai langkah strategis bagi peningkatan kegiatan ekonomi dan berkelanjutan, dalam rangka mencapai ketahanan dan kemandirian energi listrik Nasional.

Menurut Badan Energi Internasional (IEA), penduduk dunia diperkirakan 8,7 miliar jiwa pada 2035. Dengan populasi yang terus bertambah, sementara sumber daya alam semakin terbatas, persaingan penduduk dunia akan semakin keras demi melanjutkan kelangsungan

kehidupannya. Global trends 2025 memperingatkan bahwa bakal muncul ancaman serius akibat kelangkaan bahan bakar fosil, yakni minyak dan gas (migas). Kelangkaan itu bahkan bisa mengancam kelangsungan pembangunan di banyak Negara. Terkait permasalahan global, teknologi fotovoltaik telah dikenal sebagai teknologi energi terbarukan yang berpotensi memberikan kontribusi signifikan terhadap pasokan energi di masa depan dan mengurangi emisi karbon. Oleh karena itu, penggunaan energi matahari sebagai sumber listrik penting dikembangkan secara signifikan di seluruh dunia. Energi listrik memiliki peran yang sangat vital dan strategis sehingga pengelolaannya harus dilaksanakan secara berkeadilan, berkelanjutan, optimal dan terpadu dalam rangka mencapai ketahanan energi.

6. Orisinilitas Penelitian

Banyak model energi matahari telah dikembangkan yang mencakup model linear, nonlinear, dan artificial neural network (ANN). Namun, dalam beberapa tahun terakhir, Jaringan Saraf Tiruan (JST) digunakan dalam pemodelan energi matahari untuk lokasi dengan garis lintang dan iklim yang berbeda. Penelitian potensi sumber daya energi matahari menggunakan pendekatan Jaringan Saraf Tiruan dan Sistem Informasi Geografi telah dilakukan berbagai negara. Seperti di Indonesia antara lain Rumbayan dkk (2012) dan Yandri dkk (2012). Khatib dkk (2011) Malaysia, Waewsak dkk (2013) Bangkok, Gao dkk (2013) Tiongkok, Mellit dkk (2013) dan Ceylan dkk. (2014) Turki, Wang dkk (2014) Cina, Kadirgama dkk (2014) Pahang, Carl (2014) Hawaii, Hafeez dkk. (2014) Vakili dkk. (2015) Iran, Yadav dkk (2015) India, Polo dkk (2015) Vietnam, Renno dkk (2016), Wong dkk (2016) Hongkong, Hong dkk (2016) Seoul, Deo dkk (2017) Australia, Sampaio dkk (2017), Groppi dkk (2018), Ahmed dkk (2019) Banglades.

Khatib dkk., (2011) telah memodelkan energi matahari global dan menyebar pada permukaan horizontal di Malaysia. Energi matahari global menggunakan model linear, nonlinier, logika fuzzy, dan jaringan saraf tiruan (JST) . Model energi matahari menyebar (*diffuse*) menggunakan model linear, nonlinier, dan jaringan saraf tiruan (JST). Seluruh pemodelan dievaluasi menggunakan nilai statistik yaitu MAPE, RMSE dan MBE. Hasil dari penelitian tersebut, model JST mendapatkan nilai evaluasi lebih unggul dibandingkan dengan model lain di mana MAPE dalam menghitung energi surya global di Malaysia oleh model JST adalah 5,38%, sedangkan MAPE untuk model logika linier, nonlinear, dan fuzzy adalah 8,13%; 6,93%; dan 6,71%, Hasil untuk energi surya difus menunjukkan bahwa MAPE dari model JST adalah 1,53%, sedangkan MAPE dari model linier dan nonlinier adalah 4,35% dan 3,74%. Penelitian tersebut memberikan kesimpulan jika model JST yang akurat dapat digunakan untuk memprediksi energi matahari di Malaysia dan daerah sekitarnya.

Di tahun 2012, Yandri dkk., (2012) melakukan analisis prospek pengembangan energi surya untuk kebutuhan listrik di Indonesia. Berdasarkan data penyinaran matahari yang dihimpun dari 18 lokasi di Indonesia, radiasi surya di Indonesia dapat diklasifikasikan berturut-turut sebagai berikut : 1. Kawasan Barat Indonesia (KBI) dengan distribusi penyinaran sekitar 4,5 kWh/m²/hari dengan variasi bulanan 10% 2. Kawasan Timur Indonesia (KTI) dengan distribusi penyinaran sekitar 5,1 kWh/m²/hari dengan variasi bulanan sekitar 9%.

Prediksi radiasi matahari dilakukan oleh Khatib dkk., (2012) menggunakan beberapa topologi JST seperti topologi generalisasi (GRNN), *backpropagation feed-forward* (FFNN), *backpropagation cascade-forward* (CFNN), dan *backpropagation Elman* (ELMNN). Tiga nilai statistik yang digunakan untuk mengevaluasi kemandirian JST adalah kesalahan persentase rata-rata (MAPE), kesalahan bias rata-rata (MBE) dan kesalahan rata-rata akar (RMSE). Hasil dari

penelitian tersebut, evaluasi nilai GRNN lebih baik dari metode lainnya. Nilai rata-rata MAPE, MBE dan RMSE menggunakan GRNN adalah 4,9%, 0,29% dan 5,75%. Nilai rata-rata MAPE, MBE dan RMSE menggunakan FFNN adalah 23%, -0,09% dan 21,9%. Nilai rata-rata MAPE, MBE dan RMSE menggunakan CFNN adalah 22,5%, -19,15% dan 21,9%. ELMNN adalah yang terburuk di antara metode yang diusulkan dalam memprediksi radiasi matahari setiap jam dengan nilai MAPE, MBE dan RMSE rata-rata 34,5%, -11,1% dan 34,35%.

Di Indonesia, Rumbayan dkk., (2012) memprediksi radiasi matahari dengan variabel input jumlah bulan, *latitude*, *longitude*, ketinggian, kecepatan angin, pengendapan, durasi sinar matahari, kelembaban dan suhu dengan studi kasus di Indonesia. Evaluasi dari penelitian tersebut memberikan hasil rata-rata kesalahan iradiasi matahari global di bawah 5%. Nilai MAPE paling sedikit 3,29 % dicapai oleh estimator terbaik dengan struktur MLP yang terdiri dari 9, 11, 1 neuron di masing-masing *input*, *hidden layer*, dan *output layer*. Model JST berhasil memperkirakan lokasi yang tidak diketahui menggunakan kota yang diuji seperti Jakarta, Samarinda, Manado, Ambon dan Bengkulu masing-masing sebesar 4,9%; 1,2%; 2,7%; 4,5%; dan 3,5%.

Waewsak dkk., (2013) telah memprediksi radiasi global bulanan di Bangkok menggunakan input JST yaitu suhu maksimum, suhu minimal, suhu rata-rata, kelembapan relatif, jumlah curah hujan dan durasi sinar matahari periode 2001-2010 dari Thailand Meteorologi Department (TMD). Penelitian tersebut memprediksikan rata-rata jumlah jam sinar matahari bulanan di kisaran 3,58 - 9,55 jam/hari, GSR rata-rata bulanan di atas atmosfer Bangkok berada pada kisaran 5,64 hingga 22,53 MJ/m²/hari.

(Kadirgama dkk. 2014) menyajikan prediksi radiasi matahari di Pahang menggunakan metode jaringan syaraf tiruan. Sekitar 1.617 data efek suhu, kelembaban, kecepatan angin,

angin dingin, tekanan dan hujan pada radiasi matahari diambil untuk melatih JST. Hasil dari penelitian tersebut, rata-rata persentase kesalahan absolut maksimum ditemukan kurang dari 7,74% dan nilai *R-squared* (R^2) ditemukan sekitar 98,9% untuk set pengujian. Namun, nilai-nilai ini ditemukan 5,398% dan 97,9% untuk data pelatihan.

Vakili dkk. (2015) memprediksi rata-rata absorpsi radiasi matahari berbasis metode JST menggunakan input suhu maksimal, suhu minimal, kelembapan relatif, kecepatan angin dan jumlah partikel di udara dengan studi kasus di Tehran, Iran. Dalam pemodelan JST *Multilayer Perceptron* (MLP), jumlah *Particulate Matters* (PM10 dan PM2.5) yang ada di atmosfer juga ditambahkan ke input perhitungan. Strategi pemodelan JST ini digunakan untuk memperkirakan jumlah penyerapan harian radiasi matahari global (baik langsung dan radiasi difus) pada permukaan tanah Teheran selama setahun. Selanjutnya, Indeks *Root Mean Square Error* (RMSE), *Fraksi Absolut Varians* (R^2) dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) digunakan untuk evaluasi akurasi hasil pemodelan. Penelitian tersebut memperoleh hasil RMSE 0,05 J/cm².hari, Kesalahan Persentase Absolut Rata-rata 1,5 persen dan Fraksi Absolut sebesar 99 persen.

Yadav dkk., (2015) Menilai potensi matahari negara India, Himachal Pradesh menggunakan Jaringan Saraf Tiruan (JST) yang berbasis model prediksi GSR (*global solar radiation*). Algoritma J48 dalam *Waikato Environment for Knowledge Analysis* (WEKA) digunakan untuk pemilihan parameter input/variabel prediksi GSR di pemodelan JST. Kegunaan dari algoritma J48 dalam pemilihan variabel adalah untuk mengembangkan lima model JST: JST-1, JST-2, JST-3, JST-4 dan JST-5. Hasilnya, nilai MAPE untuk JST-1 (T, Tmin, Tmax, H, SH, CI, ER, Lat, Long), JST-2 (T, Tmin, Tmax, H, SH, CI, ER), JST-3 (T, Tmin, Tmax, H, SH, CI), JST-4 (T, Tmin, Tmax, H, SH) dan JST-5 (T, Tmin, Tmax, H) adalah

16,91%, 16,89%, 16,89%, 16,38%, 6,89% dan 9,04%. Model ANN-5 digunakan untuk mengembangkan peta surya Himachal Pradesh. Diperkirakan GSR bervariasi dari 3,59 hingga 5,38 kWh/m²/hari.

Renno dkk., (2016) mengembangkan 2 pemodelan jaringan syaraf tiruan untuk memprediksi radiasi global harian (GR) dan radiasi langsung normal per jam (DNI) yang lebih akurat. Dua set parameter heterogen (variabel iklim, astronomi dan radiometrik) diperoleh dari database dan pengukuran eksperimental. Untuk setiap model JST, *multi layer perceptron* (MLP) dilatih dan divalidasi dengan sembilan konfigurasi jaringan. Kedua model arsitektur didasari oleh *feed-forward* JST yang ditraining dengan *Levenberg-Marquardt* (LM) dan algoritma beajar *Backpropagation*. Konfigurasi JST terbaik untuk memprediksi GR dan DNI diuji pada dataset baru yang berbeda. MAPE, RMSE dan R² untuk model GR masing-masing sama dengan 4,57%, 160,3 Wh/m² dan 0,9918, sedangkan untuk DNI mereka sama dengan 5,57%, 17,7 W/m² dan 0,994. Oleh karena itu, model yang diusulkan menunjukkan korelasi yang baik antara data yang diukur dan yang diprediksi dan dengan literatur.

Di Australia, Deo dkk., (2017) telah mengevaluasi tingkat akurasi JST untuk meramalkan radiasi matahari di Queensland menggunakan *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) dan *Land Surface Temperature* (LST) sebagai prediktor dengan parameter suhu permukaan tanah, ketinggian, *latitude*, *longitude*, dan jumlah bulan. Sedangkan Bou-rabee dkk., (2017) memprediksi radiasi matahari harian di Kuwait menggunakan data radiasi matahari horizontal di lima lokasi (Wafra, Kuwait International Airport, Abdaly, Rabyah, dan Sulaibiya) sebagai variabel input JST. Selain itu, Hussain dkk., (2017) menguji 4 arsitektur berbeda dari JST, yaitu model MLP, ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy-Inference*), NARX (*Non-linear Autoregressive Exogeneous*) dan GRNN (*General Regression Neural Network*) dengan

pendekatan *standalone* dan *wavelet* menggunakan variabel input suhu harian, kelembaban, kecepatan angin, durasi matahari bersinar, iradiasi horizontal global di Abu Dhabi dan membuktikan bahwa pendekatan Wavelet memiliki nilai yang lebih baik.

Ahmed dkk., (2019) menggunakan metode JST dan logika fuzzy digunakan untuk memprediksi radiasi matahari dan menginvestigasi performa PLTS berkapasitas 80 kWp dengan dengan variabel suhu udara, kelembaban, tekanan atmosfer, kecepatan angin dan suhu bumi di Bangladesh. Selain itu, (Shuvho dkk., 2019) menggunakan data suhu udara, kelembaban, tekanan atmosfer, kecepatan angin dan suhu bumi di Dhaka, Bangladesh sebagai input variabel MLP di JST untuk memprediksikan sudut dan iradiasi matahari bulanan.

Beberapa negara juga telah melakukan studi radiasi matahari dengan menggunakan penunjang perangkat lunak Sistem Informasi Geografis (SIG). Di tahun 2013, radiasi matahari diperkirakan oleh Gao dkk., (2013) menggunakan rumus regresi linear Angstrom-PreScott kemudian peta distribusi radiasi dimodelkan menggunakan SIG dengan studi kasus di Shanghai, Tiongkok. Dari penelitian tersebut diketahui bahwa Shanghai memiliki radiasi matahari global rata-rata bulanan tertinggi pada bulan Juni, Juli, September, Agustus, Mei, April, Maret, Oktober, November dan Februari, secara berurutan. Adapun untuk distribusi spasial rata-rata global radiasi matahari bulanan di Shanghai, variasi spasial global radiasi matahari di berbagai daerah tidak terlalu besar, karena daerah Shanghai relatif kecil. Singh dkk., (2013) memanfaatkan citra satelit sebagai geo-referensi dan SIG, dapat dikembangkan sebuah strategi untuk memperkirakan potensi fotovoltaik di atap pada skala makro menggunakan software Quantum GIS 1.8.0.

Penelitian potensi fotovoltaik surya (PV) untuk panel monokristalin Solar World SW260 di atap rumah (Carl, 2014). Penelitian ini menggunakan data sistem informasi geografis (SIG)

dan *Light Detection and Ranging* dengan analisis statistik untuk mengidentifikasi berapa banyak potensi fotovoltaik surya yang ada di atap rumah di kota Kailua Kona di Pulau Hawaii. Penelitian dilakukan dalam tiga tahapan yakni pemodelan radiasi matahari, perkiraan luas atap yang ada, dan perhitungan potensi PV dari radiasi matahari yang masuk. Temuan analisis statistik di area studi memperkirakan potensi energi pembangkit listrik fotovoltaik untuk rooftop (atap) sekitar 190 MWh per tahun. Berdasarkan temuan ini, dilakukan aksi pemasangan PV atap penuh pada 4.460 rumah dan bisa menginstalasi lebih dari 31.000 rumah setiap tahunnya.

Penelitian untuk memilih atap yang cocok untuk pemasangan sistem fotovoltaik (Hafeez dkk. 2014). Analisis overlay SIG dikembangkan untuk memilih atap yang cocok untuk pemasangan sistem fotovoltaik menggunakan *Digital Surface Model* (DSM) resolusi tinggi, faktor topografi dan faktor iklim sebagai input. Perhitungan radiasi matahari yang diterima untuk lingkungan perkotaan yang kompleks sangat penting karena jumlah radiasi yang diterima bervariasi dengan bayangan oleh bangunan dan pohon yang berdekatan sehingga analisis bayangan 3D dilakukan dengan menggunakan model *tree growth* di *Ecotect Analyst*. Hasil penelitian menunjukkan rata-rata yang isolasi adalah $1,65 \text{ MWh} / \text{m}^2 / \text{tahun}$ dengan 4.359 jam matahari puncak tahunan dan koefisien korelasi adalah 0,94 antara basis model Marksim dengan isolasi dari alat analisis surya. Ada $0,4 \text{ km}^2$ atap yang cocok untuk sistem fotovoltaik dari $0,6 \text{ km}^2$ area built-up dan 90% area menerima $20\text{-}30 \text{ kW/m}^2/\text{bulan}$ dalam solasi pada bulan Juni. Analisis bayangan menunjukkan bahwa jumlah radiasi matahari yang diterima akan berkurang 5% dalam 10 tahun mendatang dan 10% dalam 20 tahun mendatang.

Pada tahun 2015, SIG berbasis metode *overlay* dieksplorasi oleh Polo dkk., (2015) untuk memilih atap yang cocok dalam pemasangan sistem fotovoltaik di Vietnam menggunakan

Digital Surface Modelling (DSM). Penelitian tersebut membuat peta sumber daya energi matahari di Vietnam yang memusatkan pada tenaga surya (CSP) dan untuk teknologi photovoltaic (PV) yang terhubung ke jaringan menggunakan metode GIS. Pemetaan komponen radiasi matahari telah dihitung dari data yang diturunkan oleh satelit dan dikombinasikan dengan radiasi matahari yang berasal dari pengukuran sinar matahari dan sumber informasi tambahan lainnya seperti parameter atmosfer dan meteorologi yang terlibat. Dua skenario telah dipilih untuk studi potensi matahari: CSP Parabolic Trough 50 MWe dan pabrik Flat Plate PV yang terhubung ke jaringan sekitar 1 MW. Untuk setiap skenario yang dipilih, simulasi kinerja telah dihitung untuk mengembangkan ekspresi sederhana yang memungkinkan estimasi potensi matahari dari iradiasi matahari tahunan dan garis lintang dari setiap lokasi di Vietnam. Metode GIS mampu menggabungkan potensi matahari dengan ketersediaan lahan sesuai dengan masing-masing skenario untuk menghasilkan peta potensi surya teknis Vietnam. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa metode SIG mampu menggabungkan potensi matahari dengan ketersediaan lahan.

Tahun 2016, SIG dimanfaatkan oleh Wong dkk., (2016) untuk memperkirakan potensi fotovoltaik di Hongkong menganalisis distribusi spasial yang memungkinkan ketika tertutup awan. Investigasi distribusi spasial awan dilakukan melalui satelit geo-stasioner dari *Multi-functional Transport Satellite (MTSAT)* di Hongkong. Penelitian ini telah berhasil mengestimasi spasial terperinci dari potensi energi surya di seluruh kota, dan membantu proses pengambilan keputusan kebijakan tentang penggunaan energi terbarukan di Hong Kong. Studi ini menunjukkan bahwa potensi sistem fotovoltaik di Hong Kong adalah $2,66 \text{ TW}_H$ untuk atap rumah. Hong dkk., (2016) menganalisis area rooftop untuk pemasangan sistem fotovoltaik dengan metode analisis bayangan telah dilakukan menggunakan metode SIG. Terdapat 3

langkah utama dalam penelitian itu, dimulai dari pengumpulan dan konversi data, kemudian membuat analisis bayangan menggunakan Hillshade Analysis dan ArcGIS 10 untuk menghitung area bayangan berdasarkan ketinggian dan azimuth matahari dan langkah terakhir adalah memperkirakan area atap yang tersedia untuk instalasi sistem fotovoltaik. Dari langkah-langkah tersebut diketahui bahwa area *rooftop* yang tersedia untuk aplikasi sistem fotovoltaik mencapai 4.903 m² di Gangnam, Seoul.

Penelitian yang dilakukan oleh Groppi dkk., (2018) menilai konsumsi energi panas dan listrik serta potensi energi matahari yang dapat digunakan dari bangunan tempat tinggal menggunakan GIS. Untuk setiap bangunan, penurunan kebutuhan panas dan listrik yang tidak terbarukan telah diperkirakan baik dengan mempertimbangkan kemungkinan pemasangan PV dan PVT. Pendekatan yang digambarkan telah diterapkan dalam dua perkotaan. Hasil yang diperoleh dan diuji penerapannya dalam dua daerah perkotaan yang berbeda: pusat kota bersejarah dan distrik pinggiran kota baru. Metodologi dalam penelitian tersebut telah terbukti sesuai dengan kedua daerah yang berbeda. Di satu sisi, telah dinyatakan bahwa distrik pinggiran kota baru paling cocok untuk eksploitasi potensial matahari, terutama melalui PV. Di sisi lain, hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pengurangan permintaan energi panas tidak terbarukan akan memiliki dampak yang lebih besar pada peningkatan efisiensi bangunan.

Zhang dkk., (2019) mempertimbangkan *shading*, atenuasi awan anisotropik dan radiasi difus dengan atmosfer MODIS dapat dibuat pemodelan radiasi matahari menggunakan metode SIG. Penelitian tersebut membuat pemodelan radiasi matahari yang mempertimbangkan *shading* dan atenuasi awan anisotropik dan radiasi difus menggunakan atmosfer MODIS. Secara khusus peta *skysh*, peta awan langit, dan peta berat langit mewakili distribusi sudut obstruksi langit, sifat awan anisotropik, dan cahaya difus di atas langit masing-masing belahan.

Menggabungkan peta skysh, peta berat langit dan peta awan langit, dikembangkan model radiasi matahari di mana hubungan geometris 3D antara matahari, awan, dan medan dipertimbangkan dan anisotropik cahaya difus tersebar dan atenuasi awan dimodelkan. Pada waktu jalan layang Terra dan Aqua, model kami berkinerja baik dengan rata-rata bias relatif (MRB) $-0,2\%$. Di langit yang cerah dan sebagian berawan dengan MRB -5.86% dan -4.79% dan memiliki bias relatif absolut rata-rata (MARB) masing-masing $8,11\%$ dan $21,59\%$. Di bawah langit mendung dengan MRB $1,68\%$ dan memiliki MARB $31,71\%$.

Di Iran, SIG digunakan oleh Firozjaei dkk., (2019) untuk menyelidiki kelayakan energi surya. Evaluasi konsep risiko ke dalam analisis berbasis SIG digunakan sebagai penentu area optimal dalam pemasangan pembangkit tenaga surya. Pendekatan *Ordered Weighted Averaging* (OWA) digunakan untuk pertama kalinya. Integrasi pendekatan berbasis OWA dan analisis SIG menunjukkan bahwa nilai persentase pembangkit listrik tenaga surya terpasang di daerah yang dipilih untuk strategi yang paling pesimis dan optimis masing-masing adalah 7% dan 64% . Dari nilai tersebut, disimpulkan bahwa Provinsi Kerman, Yazd, Fars, Khuzestan, Sistan dan Baluchistan, Khorasan Selatan dan Isfahan memiliki kapasitas yang baik untuk berinvestasi dalam proyek energi surya.

Konsep pengembangan energi matahari terhadap sistem fotovoltaik juga dikembangkan oleh beberapa peneliti. Mellit dkk., (2013) menggunakan metode jaringan saraf tiruan (JST) untuk memperkirakan produksi energi yang dihasilkan oleh modul $50\text{ WP poly-crystalline}$ di hari berawan dan cerah. Lebih dari satu tahun data yang diukur (radiasi matahari, suhu udara, tegangan modul PV dan arus modul PV) telah direkam di Universitas Marmara, Istanbul, Turki (dari 1-1-2011 hingga 24-2-2012) dan digunakan untuk pelatihan dan validasi model. Hasil dari penelitian tersebut berhasil mengkonfirmasi kemampuan model-JST untuk memperkirakan

daya yang dihasilkan dengan akurasi yang masuk akal. Sebuah studi perbandingan menunjukkan bahwa model-JST berkinerja lebih baik daripada regresi polinomial, regresi linier berganda, analitik dan model satu-dioda.

Ceylan dkk. (2014) menggunakan metodologi jaringan syaraf tiruan untuk memperkirakan suhu, efisiensi dan kekuatan modul PV sesuai dengan suhu udara dan radiasi matahari. Sistem eksperimental terdiri dari modul fotovoltaik, sub sistem pemanas dan pendingin, unit kontrol derivatif integral proporsional (PID) dirancang dan dibangun. Pengujian direalisasikan di luar ruangan untuk suhu udara sekitar yang konstan dari modul fotovoltaik. Untuk menjaga suhu udara sekitar pada nilai konstan yang ditentukan sebagai 10, 20, 30 dan 40°C, subsistem pendingin dan pemanas yang menghubungkan unit kontrol PID digunakan dalam peralatan uji. Data yang diperoleh dalam penelitian tersebut digunakan untuk memperkirakan suhu modul fotovoltaik, efisiensi dan daya dengan menggunakan pendekatan JST untuk 7 wilayah Turki.

Huang dkk.,(2016) mengembangkan model jaringan syaraf tiruan untuk memperkirakan daya keluaran PV berdasarkan input sudut zenith dan sudut azimuth matahari. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa model JST yang diusulkan sangat meningkatkan akurasi estimasi dalam jangka panjang dalam berbagai kondisi cuaca. Hal ini juga menunjukkan bahwa peningkatan dalam memperkirakan output daya PV luar ruangan dengan menambahkan sudut zenith matahari dan sudut azimuth sebagai input berguna untuk metode berbasis data lainnya seperti mendukung mesin vektor regresi dan proses regresi Gaussian.

Penelitian di bidang energi terbarukan matahari juga mengembangkan konsep energi listrik berbasis wawasan lingkungan. Penelitian yang dilakukan oleh Yue dkk., (2011) berhasil mengevaluasi sumber daya energi surya di Taiwan dilakukan dengan analisis penggunaan

lahan. Temuan dalam penelitian menunjukkan bahwa pembangkit listrik fotovoltaik dan pemanas air tenaga surya memiliki potensi menghasilkan 36,1 dan 10,2 TWh listrik dan energi termal setiap tahun di Taiwan, menyumbang 16,3% dan 127,5% dari total konsumsi listrik dan energi domestik untuk pemanas air rumah tangga pada tahun 2009, masing-masing. Namun, pembangkit tenaga surya fotovoltaik yang dieksploitasi pada tahun 2009 hanya menyumbang 0,02% dari total potensi di Taiwan, sedangkan pemanas air surya yang dieksploitasi menyumbang 11,6% dari total potensi.

Dalam rangka meningkatkan pemahaman tentang biaya dan manfaat dari pembangkit listrik sistem fotovoltaik (PV) di Cina, Wang dkk., (2014) melakukan analisis biaya listrik per kWh, penggantian energi fosil dan tingkat pengurangan atau mitigasi CO₂, serta biaya per unit pengurangan CO₂ dari pembangkit listrik PV di 2020 di tingkat provinsi. Hasil dari analisis tersebut menunjukkan bahwa pada tahun 2020, pembangkit listrik berbasis fotovoltaik dapat menghemat sekitar 17,4 Mtce energi fosil dan 46,5 Tg CO₂, dibandingkan dengan 600 MWe unit superkritis berbahan bakar batubara.

Penelitian yang dilakukan oleh Sampaio dkk (2017) dengan tujuan memahami keadaan seni energi surya fotovoltaik melalui penelitian literatur yang sistematis, dimana tema-tema berikut didekati: cara untuk memperoleh energi, kelebihan dan kekurangannya, aplikasi, pasar saat ini, biaya dan teknologi sesuai untuk apa yang telah didekati dalam penelitian ilmiah yang diterbitkan hingga 2016. Hasil analisis penelitian menunjukkan bahwa studi tentang energi fotovoltaik meningkat dan dapat melakukan peran penting dalam mencapai permintaan energi tinggi di seluruh dunia. Untuk meningkatkan partisipasi energi fotovoltaik dalam pasar energi terbarukan, pertama-tama perlu meningkatkan kesadaran tentang manfaatnya; untuk

meningkatkan penelitian dan pengembangan teknologi baru; untuk mengimplementasikan kebijakan publik suatu program yang akan mendorong pembangkitan energi fotovoltaik.

Studi pengembangan energi baru terbarukan dari energi matahari secara umum memfokuskan pada satu aspek seperti potensi fisik atau radiasi wilayah lokal yang di beberapa negara telah banyak dilaporkan. Pembangkitan energi surya fotovoltaik telah menjadi perhatian dunia dalam hampir semua studi. Studi mengenai potensi energi surya dilakukan secara berkesinambungan menggunakan berbagai pendekatan dalam memprediksi intensitas radiasi matahari dengan memperhitungkan variabel meteorologis dan geografis pada lokasi yang berbeda. Gambar 1.1 memperlihatkan *roadmap* dari berbagai penelitian terdahulu yang melakukan studi pengembangan energi matahari sebagai energi listrik berdasar potensi wilayah.

Penelitian ini menganalisis energi radiasi matahari pada sistem fotovoltaik atap permukiman di seluruh Provinsi Jawa Tengah mencakup wilayah 29 Kabupaten dan 6 Kota. Penelitian mengadopsi parameter meteorologi seperti suhu lingkungan, kelembaban relatif, kecepatan angin, curah hujan, *latitude*, *longitude*, *altitude* dan validasi statistik *mean square error*, *root mean square error*, dan *mean absolut percentage error* yang telah digunakan dalam penelitian terdahulu. Adapun tujuan dari penelitian agar diperoleh informasi panen potensi energi listrik dan mitigasi karbon dioksida (CO₂) dari sistem tersebut. Penelitian ini akan menyoroti iradiasi matahari yang melintasi wilayah 29 kabupaten dan 6 kota dalam wilayah Jawa Tengah. Metode jaringan saraf tiruan diadopsi untuk memprediksi iradiasi matahari dengan memodifikasi teknik interpolasi *inverse distance weight* (IDW) untuk memperoleh peta iradiasi atau peta insolasi matahari di wilayah 29 Kabupaten dan 6 Kota. Penelitian yang mengkaji energi bersih bersumber dari energi radiasi matahari di wilayah Provinsi Jawa Tengah

yang serupa dengan studi ini mencakup seluruh wilayah kabupaten dan kota sampai saat ini belum pernah ditemukan.

D. Tujuan Penelitian

D. 1. Tujuan Umum

Tujuan umum penelitian ini adalah untuk mendapatkan panen potensi produksi energi listrik dan mitigasi karbon dioksida (CO₂) dari sistem pembangkitan listrik atap fotovoltaik permukiman di seluruh wilayah administrasi Provinsi Jawa Tengah.

D.2. Tujuan Khusus

Tujuan khusus dari penelitian ini yaitu untuk:

- 1) Mendapatkan potensi iradiasi matahari yang melintasi pada wilayah 29 kabupaten dan 6 kota di Provinsi Jawa Tengah.
- 2) Mendapatkan profil peta iradiasi matahari pada wilayah 29 kabupaten dan 6 kota di Provinsi Jawa Tengah.
- 3) Mendapatkan ketersediaan area permukaan atap permukiman pada wilayah 29 kabupaten dan 6 kota di Provinsi Jawa Tengah.
- 4) Mendapatkan panen potensi energi listrik dari sistem atap fotovoltaik permukiman pada wilayah 29 kabupaten dan 6 kota di Provinsi Jawa Tengah.
- 5) Mendapatkan potensi mitigasi karbon dioksida (CO₂) dari sistem atap fotovoltaik permukiman pada wilayah 29 kabupaten 6 kota di Provinsi Jawa Tengah.

E. Manfaat Penelitian

E.1. Manfaat bagi Ilmu Pengetahuan

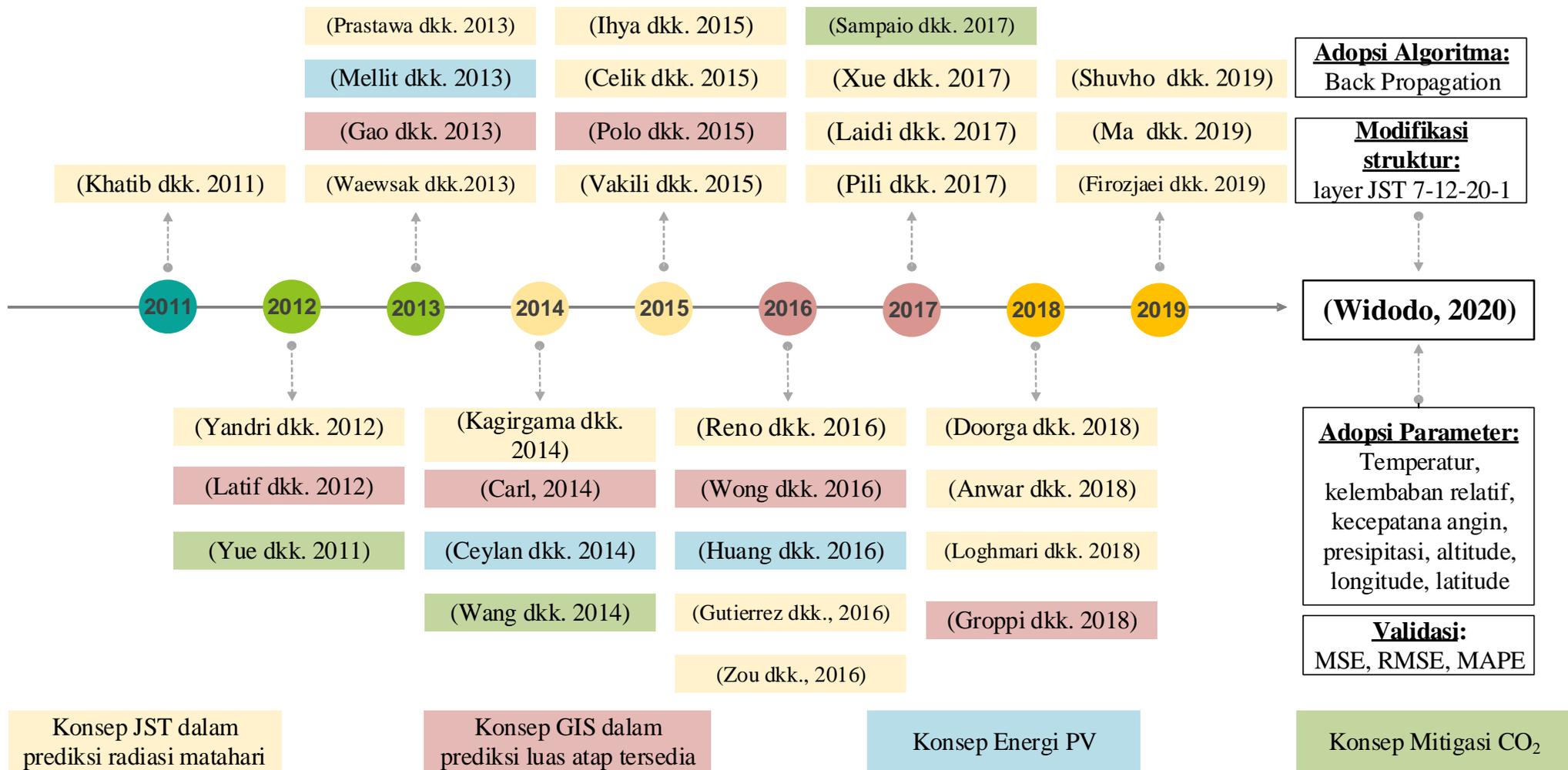
- 1) Penelitian bermanfaat memberikan pengetahuan tentang penyelidikan potensi iradiasi matahari berbasis kondisi meteorologis dan geografis wilayah lokal.
- 2) Penelitian bermanfaat memberikan pengetahuan analisa sistem produksi listrik berbasis fotovoltaik atap permukiman.
- 3) Penelitian bermanfaat memberikan pengetahuan analisa potensi pengalihan atau mitigasi karbon dioksida (CO₂) dari produksi listrik sistem fotovoltaik atap permukiman wilayah lokal.

E.2. Manfaat bagi Pemerintah

- 1) Hasil penelitian bermanfaat memberikan gambaran potensi listrik energi matahari yang tersebar di wilayah lokal. Secara khusus bagi Pemerintah Provinsi Jawa Tengah hasil studi ini sebagai informasi dalam perencanaan penyediaan energi listrik ramah lingkungan berbasis wilayah lokal.
- 2) Hasil penelitian ini dalam konteks penyediaan energi listrik secara Nasional, merupakan informasi berharga untuk perencanaan skenario pemanfaatan energi matahari sebagai energi listrik dalam upaya menjaga keberlangsungan pembangunan masa datang.
- 3) Hasil penelitian diharapkan memberikan gambaran potensi peluang pereduksian emisi gas rumah kaca dari sektor energi wilayah lokal bersumber energi matahari.
- 4) Hasil penelitian ini dalam konteks implementasi sistem energi matahari sebagai sumber listrik secara luas di berbagai wilayah, merupakan informasi berharga untuk penyediaan sumber daya manusia yang memiliki keterampilan dan keahlian memadai.

E.3. Manfaat bagi Masyarakat

- 1) Penelitian ini bermanfaat memberikan gambaran masyarakat tentang potensi energi radiasi matahari menjadi energi listrik dengan memanfaatkan ruang atap permukiman menggunakan teknologi fotovoltaik.
- 2) Masyarakat mempunyai gambaran alternatif memanfaatkan potensi energi matahari untuk sumber listrik sekaligus sebagai bentuk sosialisasi pemberdayaan lingkungan rumah sebagai penghasil energi bersih.
- 3) Bagi masyarakat pengembang energi matahari, hasil penelitian ini dapat memperkaya wawasan mengenai potensi energi matahari wilayah lokal sehingga merasa yakin dalam menawarkan aplikasi teknologi energi matahari.



Gambar 1.1 Roadmap Konsep Pengembangan Energi Matahari sebagai Energi Listrik