

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transisi Energi, Ekonomi dan Lingkungan

Salah satu tantangan terpenting yang dihadapi dalam peradaban modern adalah bagaimana caranya menyesuaikan sistem infrastruktur energi untuk memenuhi tuntutan pembangunan ekonomi yang rendah karbon, dimana saat ini bahan bakar fosil menyumbang 84 persen dari konsumsi energi dunia (IRENA, 2022). Saat ini ada gerakan yang sedang berkembang yang menyerukan transisi ke energi terbarukan, dan adanya upaya substansial dari skala global ke skala lokal untuk pembangunan ekonomi karbon rendah untuk masa depan. Sistem energi bahan bakar fosil modern masih tertanam kuat di hampir semua tingkatan ekonomi global, serta masih adanya hambatan teknis, ekonomi, dan sosial yang besar untuk mentransisikan sistem ekonomi energi ke energi terbarukan (Kramer and Haigh, 2009). Transisi energi adalah salah satu tantangan yang besar di abad ke-21, namun juga menawarkan segudang peluang menuju masa depan dunia yang makmur, berkelanjutan, dan aman (Chu and Majumdar, 2012).

Pandangan terhadap sejarah transisi energi dapat menjelaskan beberapa pertimbangan dalam proses transisi ke energi terbarukan di abad ke-21. Pola dalam sejarah transisi energi telah mengungkapkan fenomena yang konsisten dengan hukum yang telah ada, seperti hukum biaya energi jangka panjang yang stabil terhadap rasio pendapatan, hukum peningkatan kualitas energi, dan hukum peningkatan produktivitas energi (Bashmakov, 2007).

Biaya transisi energi seringkali menjadi perhatian utama, tidak hanya untuk alasan pembuatan kebijakan tetapi juga untuk keterjangkauan energi. Sejarah transisi energi membuktikan adanya pola yang konsisten dalam perhitungan rasio biaya energi terhadap Produk Domestik Bruto, yang mengakibatkan adanya umpan balik negatif antara energi dan produktivitas ekonomi dalam menjaga keterjangkauan biaya energi. Produktivitas ekonomi menurun ketika keterjangkauan energi ini terlampaui, namun ketika produktivitas energi

meningkat, maka permintaan energi menurun hingga rasio kembali ke dalam kisaran yang berkelanjutan (Bashmakov, 2007). Pola-pola tersebut telah terbukti dalam transisi energi yang tidak dibatasi oleh pasokan, sebagai asumsi yang mungkin tidak berlaku karena sumber daya bahan bakar fosil dunia semakin langka. Namun, kelangkaan bahan bakar mungkin tidak cukup untuk mendorong kelancaran transisi ke alternatif terbarukan, terutama jika penurunan biaya pengembalian investasi bahan bakar fosil mengarah ke pergerakan harga bahan bakar fosil yang sangat tidak linier (Heun and de Wit, 2012).

Transisi energi secara historis mengikuti jalur yang sudah diprediksi, yaitu dari sumber energi tradisional dengan kualitas rendah seperti kayu bakar menjadi sumber energi yang semakin berkualitas seperti bahan bakar fosil dan energi nuklir. Dalam hal ini, kualitas energi adalah sebuah ukuran produktivitas energi, dimana peningkatan produktivitas energi menyebabkan penurunan intensitas energi, atau kebutuhan energi dari produksi ekonomi. Hal umum yang terjadi dalam setiap transisi yang rumit dan berlarut-larut adalah pencarian energi yang lebih murah dan lebih baik (Fouquet, 2013). Pelayanan energi dapat ditingkatkan melalui teknologi baru atau kombinasi teknologi yang mampu mencapai efisiensi energi yang lebih baik dengan penurunan biaya secara progresif dalam lingkaran umpan balik positif yang telah mendorong transisi sistem pasokan energi (Grubler, 2012). Proses ini telah menghasilkan pemikiran tentang bahan bakar fosil yang tertanam di abad ke-21. Sistem ekonomi energi ini telah menghasilkan konsekuensi lingkungan pada skala global yang mengharuskan transisi energi berikutnya yang dapat menurunkan emisi karbon dari sistem energi global untuk menghindari terjadinya bencana perubahan iklim. Banyak langkah menuju ekonomi rendah karbon, terutama yang menekankan mitigasi dengan teknologi mahal, walaupun belum tentu menghasilkan manfaat penggunaan akhir energi yang nyata dan mampu menurunkan eksternalitas perubahan iklim (Grübler and Nakićenović, 1996).

Transisi energi secara historis ditandai dengan jeda waktu yang lama dari upaya awal menuju transisi skala yang lebih besar. Transisi energi ke sistem tenaga uap dengan bahan bakar batubara menggantikan sumber energi pra-industri

membutuhkan waktu kurang lebih 130 tahun, dan transisi ke sistem minyak, gas dan listrik modern membutuhkan waktu sekitar 80 tahun. Ukuran sistem, kompleksitas, dan basis infrastruktur merupakan variabel yang kuat dalam proses transisi energi. Ada juga faktor yang terbukti mempercepat transisi energi, seperti adanya celah pasar yang dapat mempercepat eksperimen teknologi, serta pengembangan teknologi dengan keunggulan komparatif antara kinerja, efisiensi, dan biaya, terutama dari layanan energi atau perspektif penggunaan akhir (Grubler, 2012).

Transisi energi tentunya merupakan konteks yang lebih luas dari transisi ekonomi menuju ekonomi rendah karbon. Konsumsi energi dan pertumbuhan ekonomi memiliki kaitan yang erat, walaupun keterkaitan ini banyak diperdebatkan. Hipotesis paling umum adalah bahwa terdapat hubungan searah antara konsumsi energi dengan pertumbuhan ekonomi, yang dibagi menjadi hipotesis konservasi dan hipotesis pertumbuhan, dimana hipotesis konservasi menyatakan bahwa pertumbuhan ekonomi menyebabkan kenaikan konsumsi energi, sedangkan hipotesis pertumbuhan menyatakan bahwa konsumsi energi menyebabkan pertumbuhan ekonomi.

Terdapat juga hipotesis kausalitas dua arah yang disebut hipotesis umpan balik yang menyiratkan bahwa konsumsi energi dan pertumbuhan ekonomi ditentukan bersama dan dipengaruhi secara bersamaan. Ada lembaga penelitian yang mengeksplorasi pertanyaan kausalitas ini menggunakan teknik statistik canggih termasuk Tes kausalitas Granger, model kointegrasi, pendekatan panel data, dan metode lainnya. Kesimpulan umum dari studi ini adalah tidak ada konsensus definitif tentang keberadaan atau arah kausalitas antara konsumsi energi dan pertumbuhan ekonomi (Ozturk and Acaravci, 2010). Terdapat hasil yang relatif lebih konsisten ketika analisis dipersempit ke konsumsi listrik dan pertumbuhan ekonomi, yang menyatakan bahwa kausalitas berjalan searah dari konsumsi listrik terhadap pertumbuhan ekonomi.

Stern and Enflo (2013) mengungkapkan adanya hubungan yang saling menyebabkan atau umpan balik antara konsumsi energi dan pertumbuhan ekonomi baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Meskipun demikian,

pertumbuhan sistem ekonomi energi yang kompleks ini dibatasi oleh sumber energi tak terbarukan yang terbatas dan batasan pada efisiensi teknis. Jadi, perubahan teknologi dan substitusi energi tak terbarukan dengan sumber energi terbarukan akan berperan penting dalam transisi menuju ekonomi rendah karbon.

Proses fundamental dari perubahan teknologi adalah inti dari transisi energi, dengan pola konsisten yang dibuktikan dalam catatan sejarah. Pola-pola ini telah menjadi subjek dari banyak upaya untuk memodelkan difusi dan substitusi teknologi. Banyak pola difusi yang mencerminkan lintasan pertumbuhan asimtotik, dimana tahap awal suatu teknologi ditandai dengan pertumbuhan eksponensial, sedangkan selanjutnya tahap tumbuh secara linier setelah mencapai satu persen penetrasi global (Kramer and Haigh, 2009). Salah satu faktor kunci yang mendorong pola difusi ini adalah tingkat perputaran persediaan modal. Banyak barang modal dalam sistem energi memiliki umur 20 sampai 50 tahun, yang menyiratkan bahwa hanya dua hingga lima persen dari stok itu yang perlu diganti setiap tahun. Pensiun dini dari stok modal energi yang ada tidak mungkin terjadi kecuali total modal dan biaya operasi dari teknologi baru kurang dari biaya operasional teknologi yang ada.

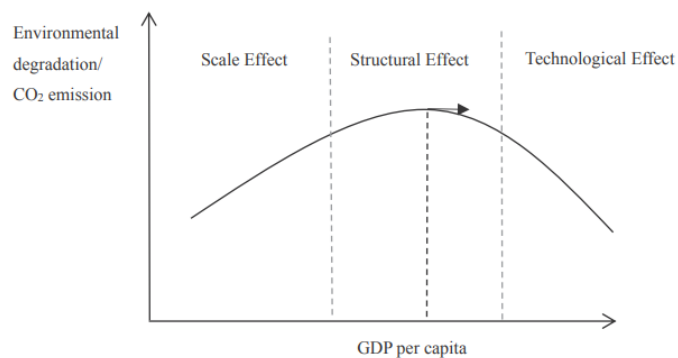
Meskipun demikian, biaya bukan satu-satunya faktor yang menentukan tingkat perubahan teknologi, akan tetapi faktor performa teknologi atau kemampuan untuk menghadirkan layanan energi baru yang merupakan pendorong utama dalam penyerapan awal teknologi baru. Ada sejarah panjang adopsi teknologi baru terlepas dari kerugian biaya yang muncul dibandingkan dengan penggunaan teknologi yang telah ada. Biaya teknologi baru dapat bersaing dengan teknologi lama setelah melewati proses pembelajaran yang kelanjutan (Grubler, 2012).

Sadorsky (2009) menjelaskan bahwa ketika perekonomian mengalami pertumbuhan, maka konsumsi energi juga akan meningkat, sebaliknya jika perekonomian mengalami penurunan maka permintaan akan energi juga mengalami penurunan. Konsumsi energi dikaitkan dengan berbagai macam dampak lingkungan, terutama polusi udara, polusi air, degradasi lahan, serta

terjadinya perubahan iklim sebagai dampak dari emisi karbon dioksida (CO₂) dan metana (Dincer, 1999).

Meningkatnya emisi karbon merupakan akibat langsung dari pertumbuhan ekonomi, yang akan membawa fase awal kerusakan lingkungan yang diikuti oleh fase perbaikan selanjutnya. Hipotesis ini disebut Environmental Kuznets Curve (EKC) yang didefinisikan oleh Panayotou (1993). Hipotesis EKC telah banyak diperdebatkan dalam literatur mengenai hubungan antara pencemaran lingkungan dan pertumbuhan ekonomi sejak diajukan, khususnya dalam beberapa tahun terakhir.

Panayotou (1993) mengemukakan bahwa pertumbuhan ekonomi memiliki tiga efek yang berbeda pada pencemaran lingkungan atau emisi karbon yaitu: efek skala, efek struktural dan efek teknis (Gambar 2.1). Efek skala menunjukkan bahwa pembangunan ekonomi akan membutuhkan lebih banyak sumber daya energi, menghasilkan lebih banyak emisi karbon pada tingkatan teknologi tertentu. Efek struktur artinya transformasi struktural dalam proses pembangunan ekonomi dapat mempengaruhi kualitas lingkungan karena industri berpolusi tinggi secara bertahap digantikan oleh industri berpolusi rendah, yang mengarah ke pengurangan keseluruhan jumlah emisi. Efek teknis mengacu pada adopsi teknologi hemat energi karena inovasi dan kemajuan teknologi menghasilkan lebih sedikit polusi, atau bahkan pengurangan emisi secara total walaupun terdapat pertumbuhan ekonomi. Tingkat emisi karbon menunjukkan bentuk U terbalik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar Error! No text of specified style in document..1 Environmental Kuznet Curve (EKC)

Dorongan utama di belakang transisi ke energi terbarukan adalah untuk mengurangi dampak buruk dari sistem energi berbasis bahan bakar fosil, terutama yang terkait dengan perubahan iklim. Transisi ke energi terbarukan telah diusulkan sebagai strategi utama untuk mendekarbonisasi sistem energi, karena terdapat bukti hubungan kausal yang kuat antara konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca (Soytas, Sari and Ewing, 2007).

Teknologi energi terbarukan bukannya tanpa serangkaian dampak lingkungan yang merugikan. Dampak lingkungan tersebut tertutupi oleh skala penyebaran yang relatif kecil hingga saat ini, tetapi bisa menjadi hambatan yang signifikan untuk transisi skala yang lebih besar. Teknologi yang akan dikembangkan dalam transisi ke energi terbarukan kemungkinan akan berkisar seputar energi surya, angin, bioenergi, serta hidro di beberapa tempat tertentu.

Proses produksi modul untuk energi surya membutuhkan banyak energi dan prosesnya menghasilkan racun. Energi angin juga bergantung pada proses industri yang membutuhkan energi dan material yang besar untuk produksi turbin, serta dapat berdampak negatif pada polusi suara, estetika, dan satwa liar di lokasi pemasangan turbin angin. Bioenergi dapat dikaitkan dengan emisi gas rumah kaca yang lebih rendah, tetapi telah ditemukan memiliki dampak lingkungan yang lebih tinggi. Disemua teknologi energi terbarukan ini, kebutuhan lahan yang luas merupakan dimensi yang sering diabaikan.

Pergeseran dari konsumsi sumber energi berkualitas rendah ke sumber energi berkualitas lebih tinggi berdasarkan perspektif sistem energi global kemungkinan besar akan mampu mengurangi dampak energi terhadap lingkungan, seperti peralihan dari batu bara ke gas alam yang menyebabkan emisi menjadi menurun. Meskipun demikian, peralihan dari energi bahan bakar fosil ke energi terbarukan tergantung pada faktor-faktor kompleks seperti pengembalian investasi, harga energi, penggunaan teknologi, dan yang terpenting dampak lingkungan yang terkait dengan teknologi terbarukan.

Biaya kerusakan lingkungan akibat pembakaran bahan bakar fosil jika diinternalisasikan ke dalam harga keluaran listrik yang dihasilkan, dapat menyebabkan sejumlah teknologi terbarukan secara finansial menjadi kompetitif

dibandingkan pembangkit batubara (Owen, 2006). Atas dasar proyeksi biaya yang dibuat berdasarkan asumsi teknologi yang matang dan adanya skala ekonomi, maka teknologi terbarukan akan memiliki keuntungan biaya sosial yang signifikan jika eksternalitas produksi listrik dapat diinternalisasikan. Memasukkan eksternalitas lingkungan secara eksplisit ke dalam tarif listrik saat ini akan mempercepat proses transisi energi ini. Salah satu cara melakukan internalisasi menurut Reksohadiprodjo dan Brodjonegoro (2000) adalah dengan campur tangan pemerintah melalui peraturan. Pendekatan dengan campur tangan pemerintah dapat dilakukan dengan tiga cara yaitu: pengaturan dan pelarangan, pajak dan subsidi, serta melalui penerapan tarif limbah. Pengaturan dan pelarangan dapat dilakukan dengan menetapkan baku mutu lingkungan. Dalam pendekatan pajak dan subsidi, pemerintah memberikan insentif untuk penggunaan alat pengendali pencemaran atau menarik pajak bagi penggunaan peralatan yang menghasilkan pencemaran yang besar. Tarif pajak yang optimum adalah sebesar biaya sosial marjinal. Pada pendekatan tarif limbah, pemerintah memberikan tarif kepada perusahaan yang menghasilkan pencemaran sesuai dengan besarnya bahan pencemar yang dihasilkan.

2.2 Transisi Energi Melalui Metode *Co-firing* Batubara dan Biomasa

Pemerintah melalui Peraturan Presiden No 22 Tahun 2017 mengenai target menggunakan energi baru dan terbarukan, mendukung metode *co-firing* dengan biomasa sebagai substitusi batubara untuk diterapkan di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) batubara. PLTU batubara merupakan sektor penting energi nasional, tetapi dengan adanya *Paris Agreement* mengenai efek rumah kaca dan emisi, perlu terobosan baru energi terbarukan yang ramah lingkungan.

Co-firing biomasa merupakan pembakaran biomasa di pembangkit listrik tenaga uap bersama dengan batubara. *Co-firing* akan memainkan peran penting dalam menumbuhkan penggunaan biomasa dalam pembangkit listrik dan mengurangi emisi gas rumah kaca, karena hanya membutuhkan investasi tambahan yang relatif kecil untuk retrofit pembangkit batubara yang ada. Teknologi pembangkit listrik *co-firing* menggabungkan pemanfaatan pembangkit

batubara dan biomasa untuk saling melengkapi keunggulan. *Co-firing* merupakan cara yang efektif untuk menyelesaikan kelebihan kapasitas pembangkit listrik tenaga batubara, mempercepat transformasi dan peningkatan pembangkit listrik dari energi terbarukan. Pemanfaatan biomasa untuk produksi listrik menghasilkan emisi gas rumah kaca yang lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit batubara murni, dengan pengurangan emisi sebesar 76% (Beagle and Belmont, 2019).

Co-firing memberikan banyak keuntungan dibandingkan dengan pembangkit listrik yang membakar 100% biomasa, termasuk biaya modal yang lebih rendah, efisiensi yang lebih tinggi, peningkatan skala ekonomi, dan biaya listrik yang lebih rendah karena ukuran yang lebih besar dan kinerja yang unggul dari pembangkit listrik tenaga batubara konvensional (Roni et al., 2017).

Pemanfaatan biomasa melalui metode *co-firing* pembangkit batubara selain mengurangi emisi gas buang melalui pengurangan pemakaian batubara, secara gradual juga sebagai transformasi menuju pemanfaatan energi terbarukan. *Co-firing* biomasa dapat memiliki peran dalam mencapai target pemanfaatan energi terbarukan karena dapat mengurangi potensi dampak lingkungan yang terkait dengan pembakaran bahan bakar fosil (Roni et al., 2017). *Co-firing* biomasa dengan batubara dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan dapat berperan sebagai batu loncatan untuk mengembangkan infrastruktur pasokan biomasa (Cutz, Berndes and Johnsson, 2019). *Co-firing* biomasa dan batubara juga dapat berkontribusi secara signifikan untuk mengurangi emisi CO₂ dibandingkan dengan pembangkit listrik yang hanya menggunakan batubara, karena biomasa memiliki lebih sedikit heteroatom dan abu dibandingkan dengan batubara (ERIA, 2020).

Biomasa memiliki kandungan sulfur dan nitrogen yang lebih rendah daripada batubara sehingga saat pengoperasian emisi gas NO_x dan SO_x dapat dikurangi (BPPT, 2021). Biomasa dari limbah tanaman hutan dapat dianggap sebagai karbon netral dan emisi dari tahap produksi produk utama dapat diabaikan dalam perhitungan terkait kebijakan karena bahan baku dianggap sebagai produk sampingan (Schlamadinger et al., 1995).

Mengacu kepada penelitian Wang et al. (2019) bahwa mencampur sebagian komposisi batubara dengan biomassa untuk PLTU akan berdampak pada manfaat kesehatan dan lingkungan melalui pengurangan emisi polutan berbahaya. Berikut tingkat emisi dari pembangkit listrik berbahan bakar batubara di China diasumsikan sesuai dengan kondisi saat ini.

Tabel Error! No text of specified style in document..1 Perbandingan Emisi Batubara dan Biomasa.

Emisi	Coal (g/kWh)	Biomass (g/kWh)
Carbon Dioxide (CO ₂)	975,6	64,0
Particulate Matter (PM _{2.5})	0,18	0,08
Nitrogen Oxide (NO _x)	0,92	1,77
Sulfur Dioxide (SO ₂)	1,51	0,12

Penerapan *co-firing* biomassa secara teknis sangat layak, namun biaya masih menjadi penghalang utama untuk meningkatkan *co-firing* batubara dan biomassa. Keekonomisan *co-firing* tergantung pada lokasi, jenis pembangkit listrik, dan ketersediaan bahan bakar biomassa berbiaya rendah. Biomassa tidak kompetitif secara ekonomi untuk produksi listrik di pasar energi saat ini kecuali dalam aplikasi khusus di mana biaya bahan bakar masih rendah, seperti fasilitas pengolahan bubur kertas dan kertas yang terintegrasi. Biomassa umumnya lebih mahal daripada batubara. Biaya yang dikeluarkan untuk tanaman energi khusus bisa jauh lebih tinggi (Milbrandt and Overend, 2009).

Pasokan bahan bakar adalah faktor biaya yang paling penting. Biaya biomassa tergantung pada banyak faktor seperti iklim, kedekatan dengan pusat populasi, dan keberadaan industri yang menangani dan membuang kayu. Harga rendah, biaya pengiriman rendah, dan pasokan yang dapat diandalkan sangat penting. *Co-firing* menjadi ekonomis jika harga biomassa sama atau lebih kecil dari biaya batubara, berdasarkan nilai kalor/panas yang dimilikinya. Biaya dapat meningkat secara signifikan jika biomassa memerlukan pengeringan atau

pengurangan ukuran, atau jika boiler membutuhkan pengumpan terpisah (Miller, Iles and Jones, 2013).

2.3 Kebijakan Transisi Energi

Banyak negara sudah memasuki tahap penerapan transisi ke energi terbarukan, termasuk pembuatan kebijakan untuk mendukung atau mempercepat transisi energi. Peran menyeluruh dari kebijakan energi adalah untuk mendorong kemajuan teknis dan mempercepat proses pembelajaran teknologi sehingga pada akhirnya teknologi energi terbarukan dapat bersaing dengan konvensional teknologi (Menanteau, Finon and Lamy, 2003). Transisi energi tidak hanya dilakukan melalui teknologi informasi dan teknologi pintar, tetapi juga melalui kerangka kerja kebijakan dan instrumen pasar (Lockwood et al., 2013).

Ada cukup banyak kebijakan energi yang telah diadopsi oleh berbagai negara. Kebijakan pengembangan energi terbarukan seperti halnya sektor lain juga bersifat dinamis, karena tidak ada satu kebijakan yang cocok untuk mengatasi semua hambatan. Tujuan dari sebagian besar kebijakan terkait energi terbarukan adalah untuk mendorong investasi terhadap pengembangan dan pemanfaatan energi terbarukan, meskipun pemberlakuan salah satu kebijakan belum tentu bisa menjamin solusi yang jelas yang dapat menyelesaikan hambatan yang ada dalam pengembangan energi terbarukan.

Palmer and Burtraw (2005) menyampaikan bahwa kebijakan *Feed-in Tariff* (FIT) dan *Renewable Portfolio Standard* (RPS) merupakan program yang paling menguntungkan untuk dipromosikan dalam pengembangan teknologi energi terbarukan di dunia. Kebijakan lain yang dapat diterapkan dalam transisi energi adalah *Carbon Pricing*. *Carbon pricing* merupakan instrumen yang efektif untuk mengurangi emisi sektor kelistrikan (Doda and Fankhauser, 2020). Penetapan harga pada karbon adalah salah satu alat kebijakan utama untuk mengatasi perubahan iklim di seluruh dunia.

2.4 Kebijakan *Feed-in Tariff* (FIT)

Negara-negara Eropa memacu pertumbuhan listrik terbarukan dengan menetapkan harga listrik yang menarik bagi investor. Kebijakan ini yang kemudian disebut kebijakan *Feed-in-Tariff* (FIT) yang memiliki tiga komponen: harga tetap yang cukup untuk pengembalian investasi, koneksi jaringan yang dijamin, dan kontrak jangka panjang untuk memastikan stabilitas investasi (Mendonca, 2007). Berbeda dengan subsidi pemerintah yang ditopang oleh pembayaran pajak dari masyarakat, konsep utama dari *Feed-in Tariff* (FIT) adalah menawarkan harga yang dijamin untuk jangka waktu tertentu (sekitar 15-25 tahun) kepada pemasok energi terbarukan, dan biaya tambahan ditanggung oleh tagihan listrik. Umumnya subsidi listrik dari energi terbarukan dibebankan ke konsumen listrik melalui tarif listrik.

Dengan adanya kebijakan ini, investor tidak harus berurusan dengan proses rumit berbagai insentif dan pembebasan pajak, seperti yang diterapkan di Amerika (Farrell, 2009). Harga ini ditinjau setiap tahun dan dapat diturunkan jika menarik terlalu banyak investor atau menghasilkan keuntungan tak terduga, dan sebaliknya. Kemudian, kebijakan harga tetap ini disertai dengan mandat bagi perusahaan utilitas untuk menghubungkan listrik terbarukan ke jaringan listrik. Di Eropa, biaya koneksi ke tegangan yang lebih tinggi ditanggung oleh perusahaan utilitas, dan kontrak untuk menjual listrik mempunyai durasi yang pendek dan seragam (Farrell, 2009). Di negara Eropa *Feed-in Tariff* (FIT) mempunyai nilai yang bervariasi tergantung lokasi, teknologi, dan ukuran pembangkit listrik (Bhattacharyya, 2011)

Jerman mulai menerapkan kebijakan *Feed-in Tariff* (FIT) pada tahun 1990, ketika undang-undang mengharuskan perusahaan utilitas listrik untuk menghubungkan listrik terbarukan ke jaringan listrik dan untuk membeli listrik dengan harga mulai dari 65 persen hingga 90 persen dari tarif rata-rata untuk konsumen (Mez, 2012). Implementasi *Feed-in Tariff* (FIT) sejak saat itu telah mendorong ekspansi pembangkit listrik turbin angin, bermula dari 20 MW pada 1989 menjadi lebih dari 1.100 MW pada 1995 (Mez, 2012). Negara Jerman

sebagai pelopor dalam transisi energi telah menerapkan *Feed-in Tariff* (FIT) setidaknya selama dua dekade dan mencapai prestasi yang luar biasa perluasan pemanfaatan energi terbarukan. Pangsa listrik hijau di Jerman mencapai 44% pada paruh pertama tahun 2019 (IEA, 2020a).

Denmark pada tahun 1988 telah menerapkan kebijakan harga untuk listrik terbarukan yang membuka jalan bagi kebijakan *Feed-in Tariff* (FIT), di mana perusahaan utilitas diharuskan menetapkan harga yang wajar terhadap listrik dari energi terbarukan yang diproduksi. Kebijakan ini berhasil memicu perkembangan turbin angin yang mencapai kapasitas 300 MW. Kebijakan *Feed-in Tariff* (FIT) secara resmi diterapkan di Denmark pada tahun 1993, ketika harga pembelian listrik terbarukan ditetapkan sebesar 85 persen dari biaya produksi dan distribusi rata-rata dan koneksi ke jaringan listrik dan pembelian daya dijamin. Kebijakan ini telah menghasilkan 28 persen energi Denmark yang berasal dari energi terbarukan dengan turbin angin yang menghasilkan hampir 3.000 MW listrik.

Implementasi kebijakan *Feed-in Tariff* (FIT) juga mempunyai manfaat lain seperti dukungan terhadap penduduk lokal untuk kepemilikan pembangkit dari energi terbarukan, dan dengan demikian akan menciptakan lebih banyak pekerjaan dan meningkatkan dampak ekonomi bagi masyarakat (Farrell, 2009). Selain itu, penerapan *Feed-in Tariff* (FIT) dapat mendorong masyarakat umum, termasuk rumah tangga dan usaha kecil untuk berpartisipasi dalam penyebaran berbagai jenis teknologi energi terbarukan, dan mendorong instalasi energi terbarukan di daerah setempat, sehingga dapat berguna untuk mempercepat kemajuan transisi energi (Klein et al, 2008).

Terlepas dari keuntungan dalam pengembangan energi terbarukan, ada beberapa kekurangan dari *Feed-in Tariff* (FIT) yang berpotensi mengganggu fungsi pasar listrik dalam jangka panjang. Pertama, harga tetap *Feed-in Tariff* (FIT) tidak mencerminkan harga listrik yang sebenarnya, yang artinya harga listrik tidak fleksibel di bawah skema *Feed-in Tariff* (FIT). Kedua, skema *Feed-in Tariff* (FIT) hanya memberikan sedikit insentif bagi pemasok untuk dapat bersaing secara ketat, sehingga dapat membatasi inovasi pasar dan kompetisi.

Ketiga, menimbulkan beban keuangan bagi pemerintah dan konsumen di jangka panjang (Couture et al., 2010).

Klein et al. (2010) dalam studinya memperingatkan bahwa kebijakan *Feed-in Tariff* (FIT) harus tetap transparan dan tidak terlalu rumit, dan mengevaluasi struktur tarif listrik di beberapa negara yang dapat menghambat implementasi *Feed-in Tariff* (FIT). Penelitian lain di Uni Eropa mengungkapkan bahwa buruknya efektivitas kebijakan *Feed-in Tariff* (FIT) terutama disebabkan oleh kegagalan yang cenderung merupakan hambatan non-ekonomi, seperti proses administrasi yang tidak pasti dan panjang, dan kesulitan dalam mendapatkan akses ke jaringan (IRENA, 2012). Penelitian oleh ECORYS (2008) di negara-negara anggota Uni Eropa, menunjukkan bahwa ada beberapa hambatan tidak terkait biaya yang berdampak negatif terhadap penyebaran energi terbarukan ke tingkat yang berbeda. Salah satu hambatan yang paling memberikan dampak adalah hambatan administratif yang mencakup banyak masalah, seperti kurangnya koordinasi antar lembaga, lamanya waktu untuk mendapatkan otorisasi, ketidakcocokan prosedur dan peraturan, biaya operasi yang besar, perencanaan tata ruang yang tidak memadai, dan hambatan sosial. Hambatan signifikan lainnya adalah kesulitan dalam mendapatkan koneksi dan akses jaringan, dan informasi serta terbatasnya kesadaran masyarakat terkait dengan energi terbarukan.

Pemerintah Indonesia pernah mengeluarkan kebijakan *Feed-in Tariff* (FIT) terkait biomassa melalui Peraturan Menteri ESDM Nomor 27 Tahun 2014, yang kemudian direvisi melalui Peraturan Menteri ESDM nomor 21 tahun 2016, seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.2.

Tabel Error! No text of specified style in document..2 Peraturan Menteri ESDM No.21 Tahun 2016

Sumber Energi Terbarukan	Kapasitas (MW)	Harga FIT (cent USD/kWh)	Peraturan FIT	Keterangan
Biomasa	s.d 20 20 – 50 >50	13,50 x F 11,48 x F 10,80 x F	Peraturan Menteri ESDM No.21 Thn 2016, rev No.27 Thn 2014	Harga berdasarkan pada tegangan jaringan listrik, kapasitas serta lokasi/wilayah F = 1,0–1,7

Kebijakan Feed-in Tariff (FIT) tersebut kemudian dibatalkan oleh pemerintah melalui Peraturan Menteri ESDM nomor 9 tahun 2018 perihal pencabutan Peraturan Menteri ESDM Nomor 21 Tahun 2016 tentang Pembelian Tenaga Listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Biomasa dan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas.

Di Indonesia, biaya penerapan skema *Feed-in Tariff* (FIT) sebagian besar diserap oleh PLN dan bukan konsumen. PLN menggunakan model keuangan yang dirancang untuk menjaga harga eceran listrik tetap rendah. Indonesia juga memiliki industri bahan bakar fosil dalam negeri yang lebih mengakar. Apalagi tata kelola yang buruk di sektor energi dan peraturan lingkungan yang lemah menyebabkan pembuat kebijakan di Indonesia sering memodifikasi *Feed-in Tariff* (FIT) yang menyebabkan menurunnya kepercayaan investor (Guild, 2019).

2.4.1 Kebijakan Renewable Portfolio Standard (RPS)

Kebijakan *Renewable Portfolio Standard* (RPS) merupakan kebijakan instrumen untuk mendorong semakin besarnya produksi listrik dari sumber energi terbarukan yang memiliki karakteristik sosial dan lingkungan yang diinginkan, dengan mewajibkan pelaku pasar untuk menyalurkan listrik dalam persentase tertentu dari total penjualan berdasarkan jenis sumber energi dan teknologi yang dipakai. Di negara-negara Eropa, kebijakan tersebut juga sering disebut sebagai perdagangan sertifikat hijau atau *Tradeable Green Certificate*. Sumber energi terbarukan biasanya didefinisikan sebagai sinar matahari, angin, panas bumi, tenaga gelombang, energi pasang surut, tenaga air, dan bahan organik. Akan tetapi

definisi yang digunakan di yurisdiksi tertentu mungkin lebih sempit atau lebih luas, bergantung pada sudut pandang karakteristik sosial dan lingkungan dari masing-masing teknologi dan sumber energi (Berry and Jaccard, 2001).

Renewable Portofolio Standard (RPS) yang juga dikategorikan sebagai obligasi energi terbarukan atau *Renewable Obligation*, merupakan kebijakan yang mensyaratkan penyedia listrik di suatu negara untuk menggunakan sumber listrik terbarukan dengan presentase tertentu dari portofolio pembangkit listrik yang ada, dan membiarkan harga ditentukan oleh pasar (Bhattacharyya, 2011).

Berbeda dengan instrumen kebijakan yang didominasi pemerintah seperti *Feed-in Tariff* (FIT), maka mekanisme di balik *Renewable Portofolio Standard* (RPS) lebih berorientasi kepada pasar. Secara prinsip *Renewable Portofolio Standard* (RPS) tidak memiliki banyak perbedaan, walaupun standar dan kebijakan yang diterapkan di beberapa negara cukup berbeda. Konsep *Renewable Portofolio Standard* (RPS) adalah pemerintah akan mewajibkan perusahaan energi untuk memanfaatkan jumlah minimum tertentu dari sumber terbarukan yang memenuhi syarat dalam proses pembangkit listrik mereka (Yin and Powers, 2010).

Karakteristik utama dari *Renewable Portofolio Standard* (RPS) adalah ketergantungan pada pasar kompetitif untuk mencapai tujuan kebijakannya. Hal ini juga tergantung pada tujuannya, apakah untuk memperbaiki kegagalan pasar, mengatasi hambatan pasar, atau mengarahkan sektor kelistrikan di jalur yang berkelanjutan (Rader and Norgaard, 1996).

Di bawah skema *Renewable Portofolio Standard* (RPS), setiap pemasok listrik ritel akan bertanggung jawab atas pembelian kredit energi terbarukan, yang akan setara dengan persentase total penjualan energi pertahun. Kredit energi terbarukan akan dibuat saat energi yang memenuhi syarat sumber energi yang dihasilkan satu unit listrik yang diukur dalam kilowatt, megawatt, atau keluaran daya yang wajar. Pemasok listrik retail bisa memiliki fasilitas terbarukan sendiri dan mensertifikasi kredit energi perusahaan, membeli paket kredit energi daya terbarukan, atau kredit pembelian secara terpisah dari produsen listrik. Dalam program *Renewable Portofolio Standard* (RPS), pemasok listrik retail dan produsen energi terbarukan bernegosiasi untuk membuat pemasok mematuhi

standar terhadap masalah seperti kepemilikan, pembelian listrik, atau pembelian kredit, penggunaan teknologi yang tepat, tantangan intermiten, syarat kontrak dan ketentuan distribusi (Rader and Norgaard, 1996).

Ada tiga alasan utama mengapa kebijakan *Renewable Portfolio Standard* (RPS) semakin populer. Alasan pertama adalah bahwa *Renewable Portfolio Standard* (RPS) memberikan insentif bagi produsen energi terbarukan untuk mencari cara dalam pengurangan biaya. Program dapat dirancang untuk memastikan bahwa pengurangan biaya tersebut dapat diteruskan ke konsumen. Pengurangan biaya tersebut bisa dicapai melalui mekanisme membangun persaingan biaya di antara produsen energi terbarukan untuk mempertahankan bagian atau kuota *Renewable Portfolio Standard* (RPS) mereka. Alasan kedua adalah karena *Renewable Portfolio Standard* (RPS) dijamin mendapatkan persentase tertentu dari pasar listrik yang ada, yang dapat dihubungkan dengan target pemerintah. Pemerintah dapat menetapkan target RPS tertentu dan menunjukkan manfaat lingkungan secara langsung. Alasan terakhir adalah bahwa *Renewable Portfolio Standard* (RPS) akan meminimalkan keterlibatan pemerintah. Misalnya, anggaran pemerintah tidak akan dimasukkan ke dalam biaya operasi karena pelanggan akan membayar biaya tambahan dari program tersebut. Selain itu, proyek akan dipilih melalui pasar dan bukan oleh evaluasi pemerintah (Berry and Jaccard, 2001).

Jika perusahaan pembangkit listrik gagal mencapai standar yang diatur oleh kebijakan wajib *Renewable Portfolio Standard* (RPS), kemudian mereka harus melengkapi kekurangan dengan membeli sertifikat energi terbarukan atau *Renewable Energy Certificate* (REC) dari pasar sertifikat. Karena harga sertifikat di pasar tidak stabil, biaya pembangkitan listrik dan pendapatan untuk perusahaan energi akan lebih dapat diubah di bawah skema *Renewable Portfolio Standard* (RPS). Oleh karena itu, Dibandingkan dengan FIT, efektivitas promosi terbarukan oleh kebijakan *Renewable Portfolio Standard* (RPS) tampaknya kurang terlihat dan tidak dapat dirasakan langsung. Seperti yang terjadi di negara AS dan Inggris yang telah cukup lama menerapkan kebijakan *Renewable Portfolio Standard* (RPS) telah cukup lama diterapkan di AS dan Inggris, akan tetapi pengaruhnya

terhadap pasar listrik dan instalasi energi terbarukan masih belum pasti. (Bhattacharyya, 2011).

Karena *Renewable Portfolio Standard* (RPS) adalah kebijakan berbasis pasar, maka *Renewable Portfolio Standard* (RPS) menjadi ambigu dalam menentukan apakah peningkatan penggunaan listrik terbarukan didorong oleh kebijakan skema, atau karena mekanisme pasar. Upton Jr & Snyder (2017) menyampaikan sebuah hipotesis bahwa *Renewable Portfolio Standard* (RPS) akan menyebabkan kenaikan harga listrik, akan tetapi tidak memiliki berdampak signifikan dalam mempromosikan pembangkitan listrik berbasis energi terbarukan. Mereka berpendapat karena *Renewable Portfolio Standard* (RPS) merupakan mandat berbasis konsumsi, maka sehingga produsen listrik juga lebih memilih untuk membeli *Renewable Energy Certificate* (REC) yang diperlukan di pasar dibandingkan dengan menghasilkan energi terbarukan untuk memenuhi kewajiban mereka. Oleh karena itu, biaya *Renewable Energy Certificate* (REC) akan dibebankan pada harga listrik tetapi tidak akan berpengaruh pada promosi penggunaan energi terbarukan.

Disisi lain kebijakan *Renewable Portfolio Standard* (RPS) sejauh ini belum pernah diterapkan di Indonesia, walaupun pada pasal 1 Peraturan Menteri Nomor 50 Tahun 2017 sudah tertuang definisi Kuota Kapasitas sebagai jumlah maksimum kapasitas pembangkit yang ditawarkan kepada Badan Usaha dalam suatu periode untuk harga pembelian tenaga listrik yang ditentukan.

2.4.2 Kebijakan Carbon Pricing

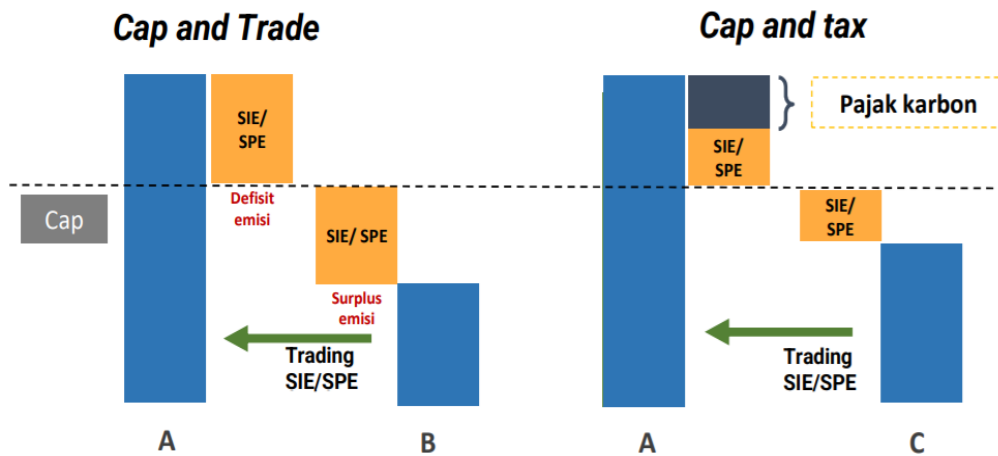
Untuk mengurangi emisi Gas Rumah Kaca (GRK), pemerintah Indonesia berkomitmen untuk melakukan transisi energi ke *Net Zero Emission* pada tahun 2060 atau lebih cepat. Pemerintah Indonesia memiliki komitmen yang kuat untuk menurunkan tingkat emisi GRK sebesar 29% di bawah skenario *Business as Usual* (BaU) pada tahun 2030 dengan upaya sendiri, atau hingga 41% dengan bantuan internasional. Menurut *Nationally Determined Contributions* (NDCs), sektor energi memiliki target untuk mengurangi emisi GRK sebesar 314 juta ton CO₂e dari BaU pada tahun 2030 dengan upaya domestik dan 446 juta ton CO₂e

dengan dukungan internasional. Kementerian ESDM juga telah menyusun prinsip-prinsip untuk mencapai *Net Zero Emissions* dan *roadmap* transisi energi, salah satunya melalui kebijakan Nilai Ekonomi Karbon (NEK) atau *Carbon Pricing* yang terdiri dari skema pajak karbon (*carbon tax*) dan perdagangan karbon (*carbon cap & trade*). (Kementerian ESDM, 2021).

Pajak karbon merupakan pajak yang dikenakan pada bahan bakar fosil. Pajak karbon bertujuan untuk mengurangi emisi karbon dioksida dan gas rumah kaca lainnya sebagai upaya untuk mengatasi pemanasan global. Pajak karbon dianggap sebagai *pigouvian tax* yang memiliki pengertian pajak atas kegiatan ekonomi yang menciptakan eksternalitas negatif (Domon et al., 2022). Eksternalitas negatif adalah aktivitas ekonomi yang menyebabkan dampak negatif pada pihak ketiga. Dampak ini dapat muncul saat tahap produksi, distribusi, atau konsumsi dari suatu produk. Pajak karbon membuat pembeli barang yang dibuat melalui proses produksi padat karbon menanggung biaya tambahan, karena produksi barang tersebut menyebabkan dampak lingkungan.

Sedangkan dalam sistem *cap and trade*, pemerintah menetapkan batas atau *cap* pada tingkat keseluruhan emisi karbon dari industri dan mengurangi batas emisi dari tahun ke tahun untuk mencapai target emisi yang ditetapkan. Sistem ini memaksa perusahaan atau industri yang melebihi kuota emisi untuk membeli kuota yang tidak terpakai dari perusahaan lain. Pemerintah menciptakan dan mendistribusikan kuota emisi melalui lelang. Hal ini dapat menciptakan insentif bagi perusahaan untuk mengurangi emisi mereka dan dapat menjualnya. Di bawah sistem ini pasar yang menentukan harga kuota. Sistem pembatasan dan perdagangan karbon mendorong perusahaan untuk mengurangi emisi secara mandiri (Goulder and Schein, 2013).

Skema *carbon tax* serta *carbon cap and trade* berdasarkan Kementerian Keuangan (2021) ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar Error! No text of specified style in document..2 Skema Carbon Pricing Menurut Kementerian Keuangan.

Pemerintah Indonesia berencana memulai pengenaan pajak karbon dengan menggunakan mekanisme pajak berdasarkan pada batas emisi (cap and tax) yang dimulai di tahun 2022 melalui penerbitan Peraturan Presiden Nomor 98 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Nilai Ekonomi Karbon untuk Pencapaian Target Kontribusi yang Ditetapkan Secara nasional dan Pengendalian Emisi Gas Rumah Kaca dalam Pembangunan Nasional.

Tujuan utama dari pengenaan pajak karbon adalah mengubah perilaku para pelaku ekonomi untuk beralih kepada aktivitas ekonomi hijau yang rendah karbon. Hal ini sejalan dengan upaya Pemerintah mencapai target penurunan emisi gas rumah kaca sebesar 29% dengan kemampuan sendiri dan 41 % dengan dukungan internasional pada tahun 2030. Selain itu, pengenaan pajak karbon memberikan sinyal kuat yang mendorong perkembangan pasar karbon, inovasi teknologi, dan investasi yang lebih efisien, rendah karbon, dan ramah lingkungan. Penerimaan negara dari pajak karbon dapat dimanfaatkan untuk menambah dana pembangunan, investasi teknologi ramah lingkungan, atau memberikan dukungan kepada masyarakat berpendapatan rendah dalam bentuk program sosial (Kementerian Keuangan, 2021).

Peningkatan harga karbon bersamaan dengan paket stimulus akan memberikan dorongan untuk investasi dalam penelitian dan pengembangan infrastruktur yang rendah karbon serta teknologi energi bersih (IEA, 2020b).

Ratnawati (2016) melakukan penelitian dengan menggunakan metode *practical approach* pada negara-negara yang telah berhasil menerapkan carbon tax. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa *carbon tax* dapat diterapkan di Indonesia.

2.5 Pemodelan Transisi Energi Melalui Pendekatan *System Dynamics*

Penggunaan berbagai teknik mulai dari pemodelan jaringan listrik hingga Pemodelan ekonomi energi, studi dan pemodelan transisi energi terbarukan telah banyak dilakukan pada skala global, nasional, dan regional.

Pemodelan transisi energi melalui metode co-firing batubara dan biomasa dalam penelitian ini menggunakan pendekatan *System Dynamics*, yang merupakan pendekatan terhadap strategi dan desain kebijakan dengan bantuan komputer. Aplikasi *System Dynamics* yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah Vensim Personal Learning Edition (PLE).

System Dynamics dapat diterapkan untuk dinamika masalah yang timbul dalam sistem sosial, manajerial, ekonomi, atau ekologi yang kompleks, yang secara harfiah merupakan sistem yang dinamis yang dicirikan oleh adanya saling ketergantungan, interaksi timbal balik, informasi umpan balik, dan kausalitas melingkar. *System Dynamics* digunakan karena kemampuannya untuk menangkap keseluruhan sistem yang dapat digunakan untuk mengeksplorasi bagaimana struktur sistem memengaruhi sistem perilaku (Richardson, 2011).

System Dynamics didasarkan pada dinamika non-linier dan teori kontrol umpan balik. Forrester (1961) menganalisis rantai pasokan secara komputasi sebagai keseluruhan sistem. Sistem ini terdiri dari tiga persediaan (pabrik, distributor dan pengecer), dan beberapa pesanan dan proses pengiriman. Forrester kemudian menyempurnakan pendekatan sebagai sebuah hierarki dengan empat lapisan: (i) sebuah batas sistem dengan loop umpan balik sebagai elemen sistem struktural dasar, (ii) variabel stok untuk mewakili proses akumulasi dalam loop umpan balik, (iii) variabel aliran untuk mewakili aktivitas di dalam loop umpan balik, dan (iv) sebuah tujuan sistem, status pengamatannya, perbedaan antara keduanya dan tindakan berdasarkan tujuannya.

Konsep *stock and flow*, dengan *feedback control* dan *system thinking*, meletakkan dasar metodologi *System Dynamics*, yang sejak saat itu, diterapkan secara luas pada berbagai masalah manajemen, misalnya pengembangan organisasi strategis, dan diperluas ke beberapa bidang lain seperti pembangunan perkotaan dan ilmu lingkungan (Senge, 1994). Model *System Dynamics* sebagian besar terdiri dari sejumlah variabel stok dan aliran yang saling berhubungan. *Stock* adalah akumulasi, atau integrasi, atau level, untuk memilih terminologi dari berbagai bidang. *Flow* mengubah jumlah *stock* (Forrester, 2009).

Menurut Wolstenholme (1983), *System Dynamics* mempertimbangkan ide pemodelan deskriptif dan kuantitatif sambil mempertahankan konten model yang cukup dan relevan untuk memberikan penjelasan perilaku sistem. Meskipun demikian, *System Dynamics* dapat dilihat sebagai pendekatan yang berguna dalam memberikan gambaran kualitatif awal yang dapat digunakan dalam langkah-langkah selanjutnya untuk menentukan kesesuaian dari teknik yang berorientasi pada masalah yang lebih spesifik, termasuk fase simulasi itu sendiri.

Pembuatan model *System Dynamics* bukan merupakan proses linier yang kaku, meskipun memiliki proses kontinuitas yang ditunjukkan dengan pengulangan, tinjauan, dan umpan balik pada setiap tahap dalam proses pengembangan.