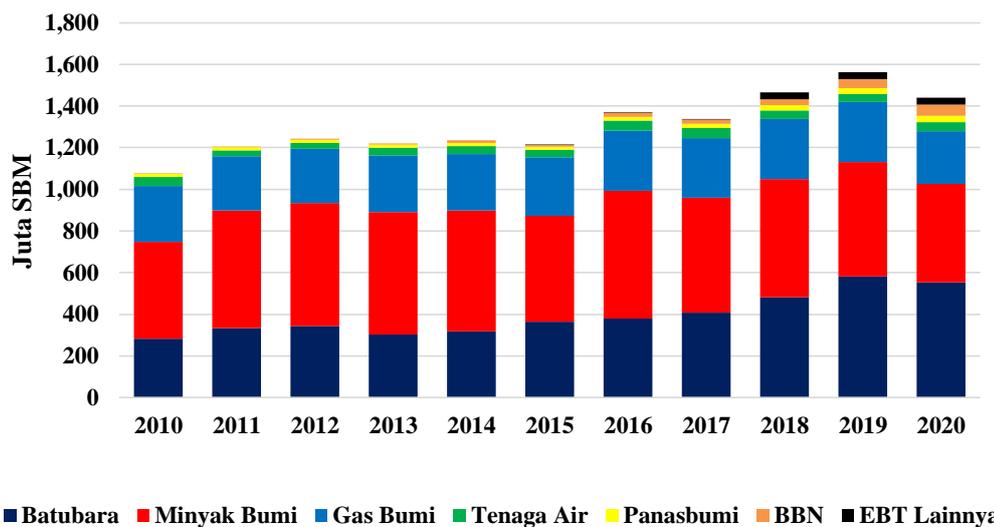


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1.Kondisi Saat Ini

2.1.1. Energi Primer dan Energi Final

Pada tahun 2020 total produksi energi primer tanpa biomassa tradisional adalah sebesar 1440,2 juta SBM, terdiri dari batubara, minyak bumi, gas bumi, tenaga air, panas bumi, BBN dan energi terbarukan lainnya. Energi primer tersebut dari tahun 2010 hingga 2020 meningkat pada tingkat rata-rata yang moderat sebesar 2,97% per tahun (KESDM, 2021a), seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Pada gambar 2.1 tersebut juga memperlihatkan perkembangan penting biofuel (berbasis minyak sawit mentah atau berbasis CPO), dimana dalam 5 tahun terakhir pasokan biofuel meningkat sangat signifikan, yaitu dari 20,6 juta SBM menjadi 55,5 juta SBM tahun 2020. Hal ini sebagai hasil dari kebijakan biofuel yang menerapkan subsidi harga dengan menggunakan anggaran yang dikumpulkan dari produsen bahan baku biofuel, yaitu industri minyak sawit. Ada peningkatan penting terkait panas bumi dan tenaga air, namun pangsa energi fosil tetap sangat dominan, terutama batubara yang mencapai 38,5%, diikuti kemudian oleh minyak bumi sebesar 32,8% dan gas bumi dikisaran 17,4%.

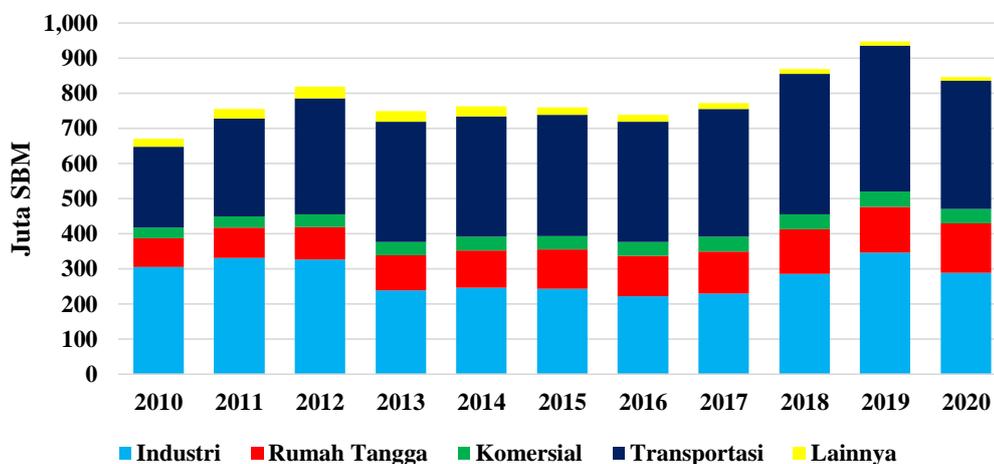


Sumber: Diolah dari Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia (HEESI) 2020

Gambar 2.1. Suplai Energi Primer Periode 2010 s.d. 2020 (KESDM, 2021a)

Energi primer digunakan untuk menghasilkan energi final seperti listrik dan bahan bakar minyak (produk kilang). Energi final ini digunakan oleh pemakai akhir (*end users*) energi yaitu sektor transportasi, rumah tangga, komersial dan industri. Beberapa bahan bakar minyak juga diubah lebih lanjut menjadi listrik.

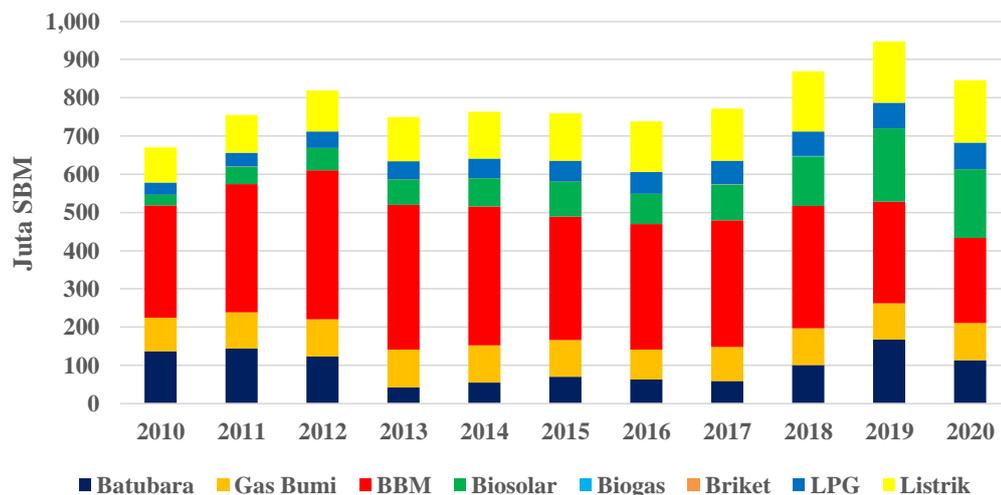
Pada gambar 2.2 ditunjukkan konsumsi energi final nasional per sektor mulai tahun 2010 sampai dengan 2020. Secara total konsumsi energi final tahun 2020 mengalami penurunan sebesar 11% dibanding tahun sebelumnya karena adanya pandemi covid-19. Sementara itu, selama satu dekade konsumsi energi tanpa biomasa tumbuh sebesar 2,4%, dari 669,6 juta SBM (2010) menjadi 845,2 juta SBM (2020) (KESDM, 2021a). Pangsa konsumsi energi final sektor transportasi sudah mendominasi selama beberapa tahun terakhir, mulai dari 34% sepuluh tahun lalu, kemudian naik tinggi menjadi 43% pada tahun 2020, bahkan sempat menyentuh 47% pada tahun 2017. Sedangkan sektor industri kondisinya kebalikan dari sektor transportasi, pangasanya turun signifikan, dari 46% (2010), menjadi hanya 34% (2020).



Sumber: Diolah dari Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia (HEESI) 2020
 Gambar 2.2. Konsumsi Energi Final Tanpa Biomasa Per Sektor (KESDM, 2021a)

Dilihat dari konsumsi energi final per jenis, peranan konsumsi BBM, terutama minyak solar, mulai disubstitusi oleh biosolar. Hal ini terlihat dari kontribusi BBM yang mencapai 44% tahun 2010, turun signifikan menjadi hanya 26% satu dekade kemudian. Sementara konsumsi biosolar pangasanya naik drastis,

dari hanya 4% tahun 2010 menjadi 21% pada tahun 2020. Konsumsi energi final biosolar untuk sektor transportasi tersebut tumbuh sangat tinggi, sekitar 20% per tahun, dari 27,94 juta SBM (2010), melesat begitu tinggi 10 tahun kemudian, menyentuh 179,3 juta SBM (KESDM, 2021a), seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3.

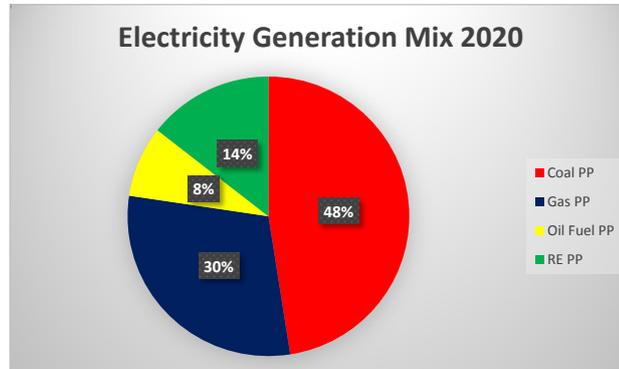


Sumber: Diolah dari Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia (HEESI) 2020
 Gambar 2.3. Konsumsi Energi Final Tanpa Biomasa Per Jenis (KESDM, 2021a)

2.1.2. Pembangkit Tenaga Listrik

Pada tahun 2020, kapasitas total pembangkit listrik nasional adalah sebesar 72,81 GW, mencakup system on grid maupun off grid (KESDM, 2021a). Bagian terbesar dalam bauran pembangkit listrik adalah pembangkit listrik tenaga batubara, sebesar 34,61 GW (48%), diikuti oleh pembangkit listrik tenaga gas sebesar 21,72 GW (30%), pembangkit listrik berbasis energi terbarukan 10,52 GW(14%), dan pembangkit listrik berbahan bakar minyak 5,97 GW (8%). Sistem tenaga listrik nasional berbasis energi terbarukan, baik yang dioperasikan oleh PLN maupun swasta, terdiri dari tenaga air (6,14 GW), tenaga panas bumi (2,13 GW), tenaga biomassa (1,78 GW), tenaga matahari (0,185 GW), tenaga angin (0,154 GW), dan biogas (0,12 GW) (KESDM, 2021a). Terlihat bahwa kapasitas PLTS dan PLTB masih rendah, namun dengan tarif listrik yang semakin kompetitif serta disertai teknologi yang handal dan keekonomian yang wajar, kedua jenis pembangkit tersebut akan berkembang dengan cepat. Gambar 2.4 memperlihatkan bauran kapasitas pembangkit listrik pada tahun 2020, yang menunjukkan pembangkit listrik tenaga batubara masih merupakan penyumbang

terbesar dalam produksi listrik nasional. Hal ini mengindikasikan bahwa untuk mengurangi Gas Rumah Kaca, aksi mitigasi harus difokuskan pada PLTU Batubara.



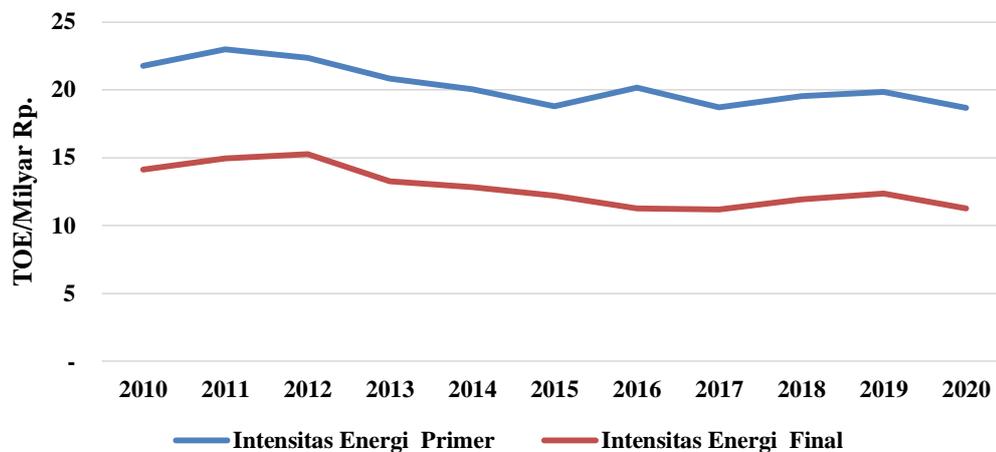
Sumber: Diolah dari Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia (HEESI) 2020

Gambar 2.4. Bauran Pembangkit Tenaga Listrik (KESDM, 2021a)

2.1.3. Intensitas Energi

Intensitas energi sebagai indikator yang menunjukkan tingkat efisiensi energi yang telah dicapai. Namun intensitas energi ini belum bisa membedakan apakah karena faktor penghematan energi (seperti substitusi bahan bakar, penerapan teknologi hemat energi, pergeseran aktivitas pengguna energi) ataukah karena terjadi pergeseran dari industri padat energi menjadi industri padat modal/jasa yang menggunakan energi lebih sedikit (Dewan Energi Nasional, 2015).

Intensitas energi ini adalah tingkat kebutuhan energi per nilai PDB atau per besarnya populasi atau per besarnya produksi dalam suatu waktu. Intensitas energi dapat dianggap konstan sepanjang rentang waktu simulasi atau turun untuk memperlihatkan kenaikan efisiensi energi (Dewan Energi Nasional, 2018).



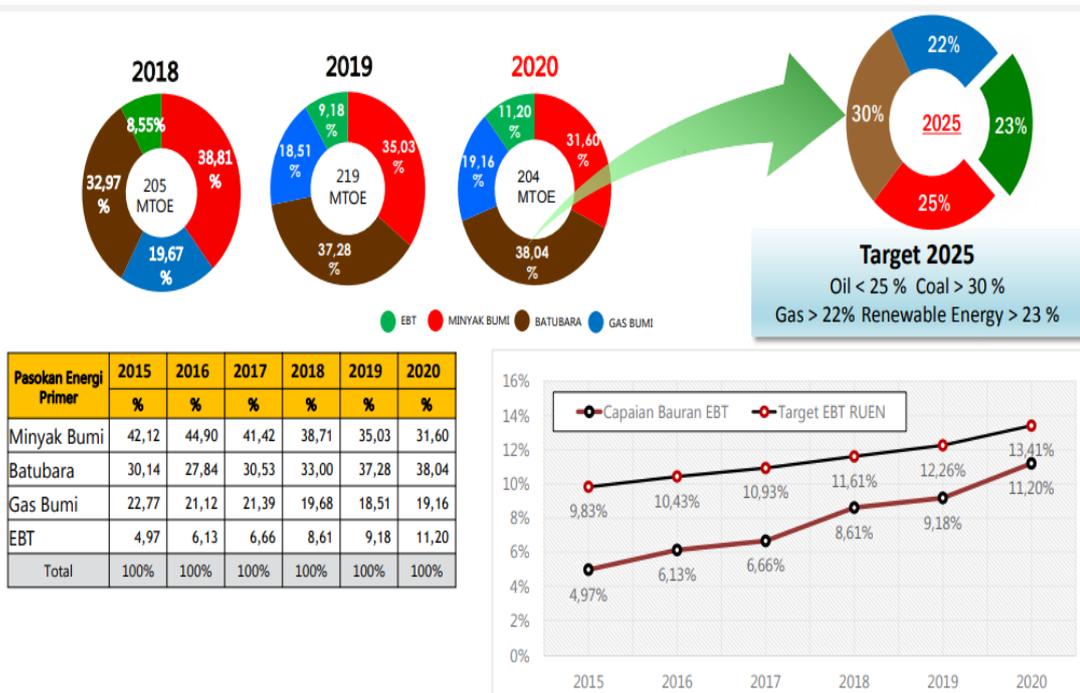
Sumber: Diolah dari Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia (HEESI) 2020

Gambar 2.5. Intensitas Energi Primer dan Intensitas Energi Final (tanpa biomassa)(KESDM, 2021a)

Gambar 2.5 menunjukkan intensitas energi primer (tanpa biomassa) maupun intensitas energi final (tanpa biomassa) yang memperlihatkan kecenderungan yang menurun selama periode 2010 s.d. 2020. Intensitas energi primer ini turun sebesar 1,5% per tahun, dari 21,8 TOE/milyar rupiah (konstan 2010) menjadi 18,7 TOE/milyar rupiah (konstan 2010). Sedangkan intensitas energi final mengalami penurunan 2,2% per tahun, dari 14,1 TOE/milyar rupiah (konstan 2010) menjadi 11,3 TOE/milyar rupiah (konstan 2010). Tingkat penurunan intensitas energi final lebih besar dibanding intensitas energi primer. Ini menunjukkan peran teknologi konversi dan teknologi proses, seperti pembangkit listrik dan kilang minyak, masih belum maksimal dalam menurunkan intensitas energi nasional (Dewan Energi Nasional, 2015).

2.1.4. Bauran Energi Primer

Pemerintah menerbitkan Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) untuk memajukan penggunaan EBT. Pada KEN ini dinyatakan bahwa target bauran EBT sebesar 23 % (Dewan Energi Nasional, 2014) direncanakan tercapai pada tahun 2025.



Gambar 2.6. Bauran Energi Primer Nasional Tahun 2020 (Kusdiana, 2021)

Faktanya, implementasi proporsi energi terbarukan pada bauran energi primer tahun 2019 hanya terpenuhi 9,18%. Pada tahun 2020, raihan bauran EBT naik tipis menjadi 11,2% (Kusdiana, 2021), seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.6. Bauran EBT tahun 2020 telah mempertimbangkan tujuh Pembangkit Listrik Tenaga Uap Batubara (PLTUB) *co-firing* yang telah berfungsi secara penuh. Pola *co-firing* pada PLTUB dilaksanakan dengan menggunakan biomasa hingga 5% sebagai paduan batubara (Kusdiana, 2021).

2.2. Penerapan Energi Baru Dan Terbarukan Secara Optimal

Peraturan di sektor energi telah diwujudkan, dalam bentuk KEN, yang mempunyai tujuan untuk pengelolaan energi yang rendah emisi. Pada KEN tersebut dibahas mengenai target bauran Energi Primer yang optimal, dimana kontribusi Energi Baru dan Energi Terbarukan pada tahun 2025 dan 2050 berturut turut minimal 23% dan 31% sepanjang keekonomiannya terpenuhi (Dewan Energi Nasional, 2014). Pengelolaan energi secara detail dituangkan dalam Peraturan Presiden No. 22 tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) (Presiden RI, 2017).

Untuk memenuhi target KEN ini, penerapan EBT secara optimal harus terus digalakkan. Mengingat bahwa pembangkit EBT, khususnya PLTS dan

PLTB, nilai LCOE-nya di berbagai negara (*Levelized Cost of Electricity*) mengalami penurunan secara drastis. Data IRENA 2021 menunjukkan bahwa LCOE PLTS skala besar di 2020 lebih rendah 85% dari LCOE di tahun 2010, dari sekitar USD 0.381/kilowatt hour (38,1 sen per kWh) menjadi USD 0.057/kWh (5,7 sen per kWh) (IRENA, 2021b). Begitu juga untuk PLTB *onshore*, turun 56%, dari USD 0,089/kWh menjadi USD 0,039/kWh (IRENA, 2021b). Adapun PLTS Terapung Cirata berkapasitas 145 MW, menurut PLN, mempunyai biaya pokok produksi (BPP) sebesar US\$5,8 sen per kWh (Ni Putu Eka Wiratmini, 2020).

Seirama dengan turunnya LCOE, pengurangan CAPEX PLTS skala besar juga terdapat di beberapa negara. Secara global, CAPEX PLTS skala besar turun sebesar 79% pada tahun 2019, dibanding tahun 2010, yaitu dari 4702 USD(2019)/kW menjadi hanya 995 USD(2019)/kW (IRENA, 2020). Namun PLT Surya dan PLT Bayu tersebut memproduksi listrik secara intermiten. Untuk itu harus ditopang oleh BESS (*Battery Energy Storage System*), digabung (*hybrid*) dengan EBT lain, atau didukung oleh PLT fosil.

Dapat dikatakan bahwa PLTS dan PLTB membutuhkan system yang baik untuk menjaga kesinambungan penyediaan tenaga listrik. Sebaliknya, pembangkit EBT dengan factor biaya rendah dan kapasitasnya bagus, seperti PLTA, PLTM, dan PLTP, biasanya terdapat di kawasan lindung yang jauh dari pusat beban, karena itu memerlukan waktu relatif lama dalam pembangunan, mulai dari perizinan, hambatan geografis hingga keadaan kahar (*force majeure*) (Rully R. Ramli, 2020).

Terkait dengan aspek lingkungan dapat disampaikan bahwa peningkatan bauran sumber energi EBT selaras dengan target penurunan emisi karbon, sebagaimana telah disetujui dalam *Paris Agreement*. Pemerintah Indonesia telah mengeluarkan UU No. 16 tahun 2016 tentang pengesahan *Paris Agreement* tersebut, yang menargetkan penurunan emisi GRK pada tahun 2030. Isu yang paling penting sekarang ini adalah adanya alternatif yang memungkinkan Indonesia untuk memenuhi kebutuhan listrik di masa depan, sekaligus memenuhi target *Paris Agreement*. Dalam konteks sistem ketenagalistrikan Jawa-Bali, untuk memenuhi target *Paris Agreement*, maka dibutuhkan tambahan kapasitas pembangkit berbasis EBT masing-masing sebesar 18,1 GW dan 22,9 GW sampai dengan tahun 2030, agar tercapai pengurangan emisi CO₂ sebesar 11% (38,9 juta tCO₂e) dan 14% (47,7 juta tCO₂e) (Handayani et al., 2017). Apabila *technological learning rates* dipertimbangkan, akan mengubah bauran

pembangkit listrik secara signifikan pada tahun 2025 dan 2050, dimana PLTS skala besar mampu bersaing dengan energi terbarukan lainnya maupun PLTN. Namun bila *technological learning rates* tidak dipertimbangkan, pemenuhan target EBT akan meningkatkan total biaya produksi listrik sebesar 15% (Handayani et al., 2019).

Beberapa pendekatan dilakukan untuk memperkirakan biaya teknologi pembangkitan di masa depan, misalnya dengan menggunakan pendekatan kurva pembelajaran (*learning curve*). Sistem ini terbukti sangat mumpuni secara historis dan nilai estimasi laju pembelajaran dapat diperoleh untuk hampir semua teknologi. Pembelajaran teknologi (*technological learning*) didasarkan pada kecepatan pembelajaran (*learning rate*) tertentu dan pada penerapan kapasitas yang didefinisikan sebagai rata-rata dari IEA's Stated Policies and Sustainable Development (WEO, 2019).

Teknologi PLTU batubara dan PLTG/PLTGU termasuk kategori teknologi komersial, dengan tingkat persebaran yang tinggi. Ongkos dan performa teknologi sudah sangat terbuka sekarang ini, dan biasanya peningkatan hanya akan terjadi secara bertahap. Oleh karena itu, ongkos dan performa di masa yang akan datang bisa diproyeksikan dengan tingkat kepastian cukup tinggi, dimana trend biaya pembangkit listrik nya pada tahun 2030 dan 2050 berturut turut sebesar 98% dan 96% (KESDM & DEA, 2021). Hal ini secara jelas ditunjukkan pada tabel 2.1.

Untuk Teknologi kategori komersial dengan tingkat penyebaran moderat contohnya adalah PLTB lepas pantai (*offshore*). Ongkos dan performa dari teknologi relative sudah diketahui saat ini. Teknologi ini dianggap memiliki potensi ekspansi yang sangat besar dan oleh karena itu terdapat tingkat ketidakpastian yang cukup besar terkait dengan harga dan kinerja di masa depan (KESDM & DEA, 2021).

Tabel 2.1. Kurva Pembelajaran dan Trend Biaya Pembangkit Listrik (Learning Curve – Cost Trend)(KESDM & DEA, 2021)

Jenis Pembangkit	2020	2030	2050
PLTS	100%	71%	52%
PLTP	100%	86%	71%
PLTA	100%	96%	89%
PLTB	100%	85%	72%
PLTUB	100%	98%	96%
PLTGU	100%	95%	89%
PLTBm	100%	91%	80%

Jenis Pembangkit	2020	2030	2050
PLTBg	100%	91%	80%

2.3. Perangkat Lunak LEAP (*Low Emission Analysis Platform*)

Dalam riset ini, pemodelan sektor energi di Indonesia dilakukan dengan aplikasi perangkat lunak terintegrasi berbasis skenario yang disebut LEAP (*Low Emissions Analysis Platform*), dan NEMO (*Next Energy Modeling System for Optimization*), digunakan untuk menghitung optimasi pembangkit dengan biaya paling rendah (C. G. Heaps, 2021);(Charles Heaps, Eric Kemp-Benedict, 2021); (Ordonez et al., 2022). Penjabaran kebijakan energi dan studi mengurangi resiko perubahan iklim, baik di sektor energi maupun non-energi, banyak menggunakan perangkat lunak LEAP (C. G. Heaps, 2021). Sementara itu, model LEAP sangat bergantung pada data input, seperti indikator ekonomi makro, konsumsi energi, metode untuk memasok energi, sumber daya untuk energi dan harga, prospek pencapaian teknologi dan biaya (Kumar & Madlener, 2016). Model LEAP cocok untuk desain sistem pemodelan LEAP di Indonesia karena model ini tidak memerlukan data awal yang terlalu banyak dan memiliki basis data teknologi dan lingkungan yang sudah dibangun di dalam model (Mirjat et al., 2018).

Selanjutnya, kumpulan data masukan LEAP terdiri dari berbagai modul, termasuk asumsi-asumsi utama, permintaan (*demand*), transformasi (*transformation*), dan sumber daya (*resources*), seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7. Modul asumsi utama meliputi Produk Domestik Bruto (PDB), pertumbuhan PDB, jumlah penduduk, penambahan penduduk, elastisitas per sektor terhadap PDB, pangsa bahan bakar di sektor industri, dan kegiatan transportasi jalan raya. Untuk memprediksi permintaan energi, modul permintaan dibagi menjadi lima sektor: rumah tangga, industri, transportasi, komersial, dan sektor lainnya. Sektor-sektor ini terkait dengan variabel demografi dan sosio-ekonomi (C. G. Heaps, 2021); (Sugiyono et al., 2020); (Mirjat et al., 2018); (Hong et al., 2019).

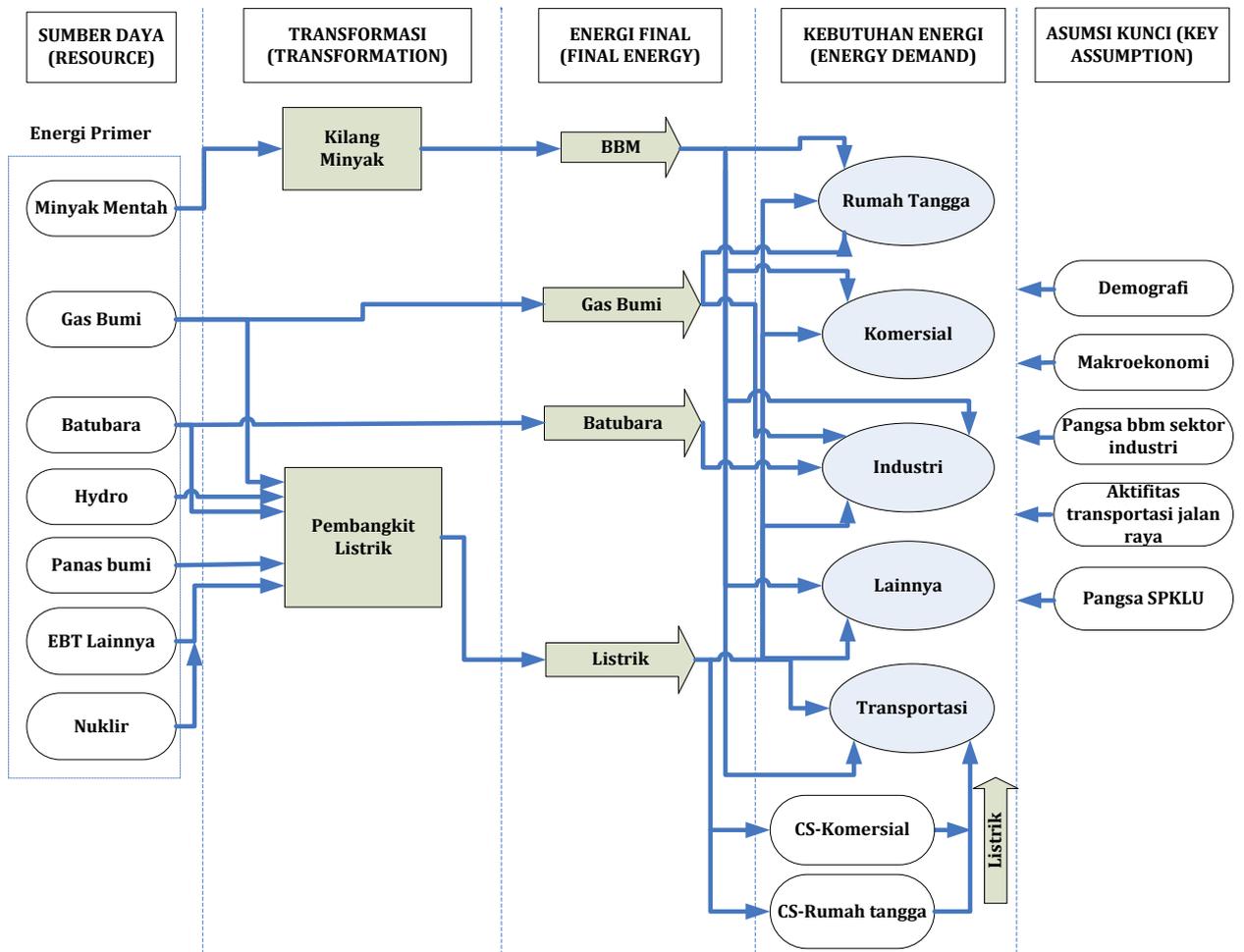
2.3.1. Reference Energy System

Struktur model LEAP mengikuti sistem dan arus energi yang terdapat dalam *Reference Energy System* (RES) seperti yang terdapat dalam gambar 2.7 dibawah ini. Pemodelan pasokan energi dan sektor teknologi konversi seperti pembangkit listrik, kilang minyak, dan produksi bahan bakar nabati dilakukan

dalam modul transformasi. Setiap modul memiliki satu atau lebih proses yang didasarkan pada teknologi yang berbeda, seperti jenis kilang minyak atau pembangkit listrik tertentu, dan menghasilkan satu atau lebih bahan bakar (C. Heaps, 2020). Dalam pembangkit listrik, proses berisi berbagai pembangkit listrik dengan bahan bakar keluaran yang sama (listrik). Dalam kilang minyak, input ke kilang hanya minyak mentah dan sebagian kecil gas alam. Namun, outputnya dapat berupa berbagai produk kilang (Winarno, 2010).

Sumber daya (*resources*) adalah pohon terakhir dalam LEAP. Cabang-cabang di bagian pohon Sumber Daya muncul secara otomatis ketika suatu jenis energi disebutkan di pohon permintaan atau pohon transformasi (C. G. Heaps, 2021). Sumber daya dibagi menjadi minyak mentah, gas alam, batu bara, energi nuklir, dan energi terbarukan. Energi hidro, panas bumi, matahari, angin, biomassa, dan biogas merupakan sumber energi terbarukan yang dipertimbangkan dalam penilaian studi ini (Hong et al., 2019).

Model LEAP digerakkan oleh permintaan akhir (*final demand*). Permintaan (*demand*) tersebut diklasifikasikan ke dalam kategori area industri, transportasi, rumah tangga, komersial, dan area lainnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Area industri dibagi menjadi sembilan subsektor industri, termasuk makanan, tekstil, kayu, pulp, dan kertas; pupuk dan bahan kimia; besi dan logam dasar; semen dan mineral non-logam; permesinan; dan sektor industri lainnya. Area transportasi dibagi menjadi empat subsektor: jalan raya, kereta api, laut, dan udara. Area rumah tangga meliputi daerah perkotaan dan pedesaan. Di daerah perkotaan, hanya wilayah yang sudah teraliri listrik, sementara wilayah pedesaan mencakup wilayah yang sudah teraliri listrik dan yang belum teraliri listrik. Di sektor komersial, peralatan termal (di hotel dan restoran), listrik, sektor swasta, dan pemerintah dibedakan berdasarkan kebutuhannya masing-masing. Area lainnya mencakup tiga sub-sektor: pertanian, pertambangan, dan konstruksi (Dewan Energi Nasional, 2016). Berdasarkan asumsi skenario, permintaan energi final untuk tahun 2020-2050 akan diproyeksikan berdasarkan sektor, subsektor, dan jenis bahan bakar. Klasifikasi sektor dan subsektor berasal dari (Dewan Energi Nasional, 2016), sedangkan jenis bahan bakar berasal dari HEESI (*Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia*, 2020) (KESDM, 2021a).



Gambar 2.7. Reference Energy System (RES)(Bappenas, 2014)

Dalam hal peran infrastruktur *charging station* (CS) untuk mendorong penetrasi kendaraan listrik (*Electric Vehicle*, EV), diasumsikan terdapat dua jenis CS, yaitu CS komersial sebagai infrastruktur pengisian daya publik dan CS rumah tangga untuk pengisian daya EV di rumah. Untuk asumsi pangsa EV yang menggunakan CS diatur dalam asumsi kunci (*key assumption*).

2.3.2. Analisis Kebutuhan Energi

Permintaan energi per sektor dipertimbangkan dengan prakiraan model *bottom-up* dengan strategi *end-use* (Santosa, 2020). Parameter utama prakiraan permintaan energi adalah perkembangan PDB dan pertumbuhan populasi. Sementara itu, transformasi pemakaian teknologi dan kebijakan public di bidang energi juga akan mempengaruhi pemakaian energi nasional. Setiap sektor

menerapkan strategi analisis yang berbeda tergantung pada jenis dan sifat sektor tersebut dan kesiapan data yang akan digunakan (Edi Hilmawan et al., n.d.).

Prakiraan kebutuhan energi final sektor industri dan komersial akan menerapkan cara perhitungan berikut ini (Edi Hilmawan et al., n.d.)(Santosa, 2020):

$$E = A \times I \quad (1)$$

Dengan:

E = Kebutuhan energi
A = Aktivitas
I = Intensitas energi final

Proyeksi permintaan energi useful sektor rumah tangga dapat dihitung dengan memakai persamaan berikut ini (Edi Hilmawan et al., n.d.):

$$E = A \times U/Eff \quad (2)$$

Dengan:

E = Kebutuhan energi
A = Aktivitas
U = Intensitas energi useful
Eff = Efisiensi

Sistem *stock turnover* diterapkan pada sektor transportasi jalan raya, dimana kebutuhan energy dipertimbangkan berlandaskan perkalian antara aktivitas sektor/ subsektor dan intensitas energinya (Santosa, 2020).

$$E = S \times D/C \quad (3)$$

Dengan:

E = Kebutuhan energi
S = Jumlah kendaraan (stock)
D = Jarak tempuh
C = Konsumsi energi spesifik (konsumsi energy per satuan jarak tempuh)

Pada model LEAP untuk area transportasi ada empat jenis model perhitungan aktivitas yaitu kendaraan-km, penumpang-kilometer, ton-kilometer, dan PDB angkutan laut. Satu ‘penumpang-km’ menentukan suatu keinginan untuk menggerakkan satu orang sejauh satu km. Sedangkan satu ‘ton-km’ menentukan keinginan untuk menggerakkan satu ton barang sejauh satu km (Santosa, 2020).

2.3.3. Analisis Pasokan Energi

Teknologi konversi dan proses pada sisi pasokan seperti pembangkit tenaga listrik, kilang LPG maupun kilang minyak dapat meningkatkan kapasitasnya dan *process dispatch* (pengiriman daya sesuai permintaan). Selain itu model penyediaan energi juga dilengkapi dengan ekspor, impor, dan produksi tambang (batubara, gas alam dan minyak bumi) (BPPT, 2020). Pada *process dispatch* untuk teknologi konversi sudah menerapkan metode optimasi dengan NEMO, sedangkan pada teknologi proses hanya mengaplikasikan metode simulasi. Sistem simulasi ini berdasarkan pada akselerasi kapasitas untuk memenuhi kebutuhan berdasarkan peta jalan yang sudah ditetapkan pemerintah (BPPT, 2020).

Kapasitas pembangkit listrik dapat ditentukan sebagai *endogenous* untuk menjaga nilai *planning reserve margin* (PRM) yang telah ditetapkan. Kalkulasi kapasitas pembangkit diawali dengan mengalkulasi nilai kapasitas yang ada dengan persamaan 4 (Suhono et al., 2019).

$$C_{BA} = (EX + CN_{EN}) \times C_{value} \quad (4)$$

Dimana :

C_{BA} : kapasitas awal (MW),

C_{EX} : kapasitas exogenous (MW),

CN_{EN} : kapasitas endogenous yang telah ditambahkan sebelumnya (MW),

C_{value} : persentase nilai kapasitas aktual (MW).

Sementara kapasitas yang diperlukan untuk mencukupi beban puncak dikalkulasi dengan memakai persamaan 5 (Suhono et al., 2019).

$$C_{peak} = \frac{D}{LF \times 8760 \left(\frac{jam}{tahun} \right)} \quad (5)$$

Dimana :

C_{peak} : kapasitas untuk mencukupi beban puncak (MW)

D : kebutuhan energi listrik (MWh),

LF : faktor beban sistem.

PRM sebelum ada penambahan kapasitas secara endogenous dinilai berlandaskan persamaan 6 (Suhono et al., 2019).

$$PRM_{BA} = \frac{C_{BA} - C_{peak}}{C_{peak}} \quad (6)$$

Dimana PRM_{BA} adalah PRM sebelum ada penambahan kapasitas. Kemudian, kapasitas pembangkit listrik yang dibutuhkan sebagai endogenous ditetapkan dengan persamaan 7 (Suhono et al., 2019).

$$C_{ENA} = (PRM - PRM_{BA}) \times C_{peak} \quad (7)$$

Dimana C_{ENA} adalah kapasitas pembangkit listrik yang harus ditambahkan untuk mempertahankan PRM pada nilai yang telah ditetapkan.

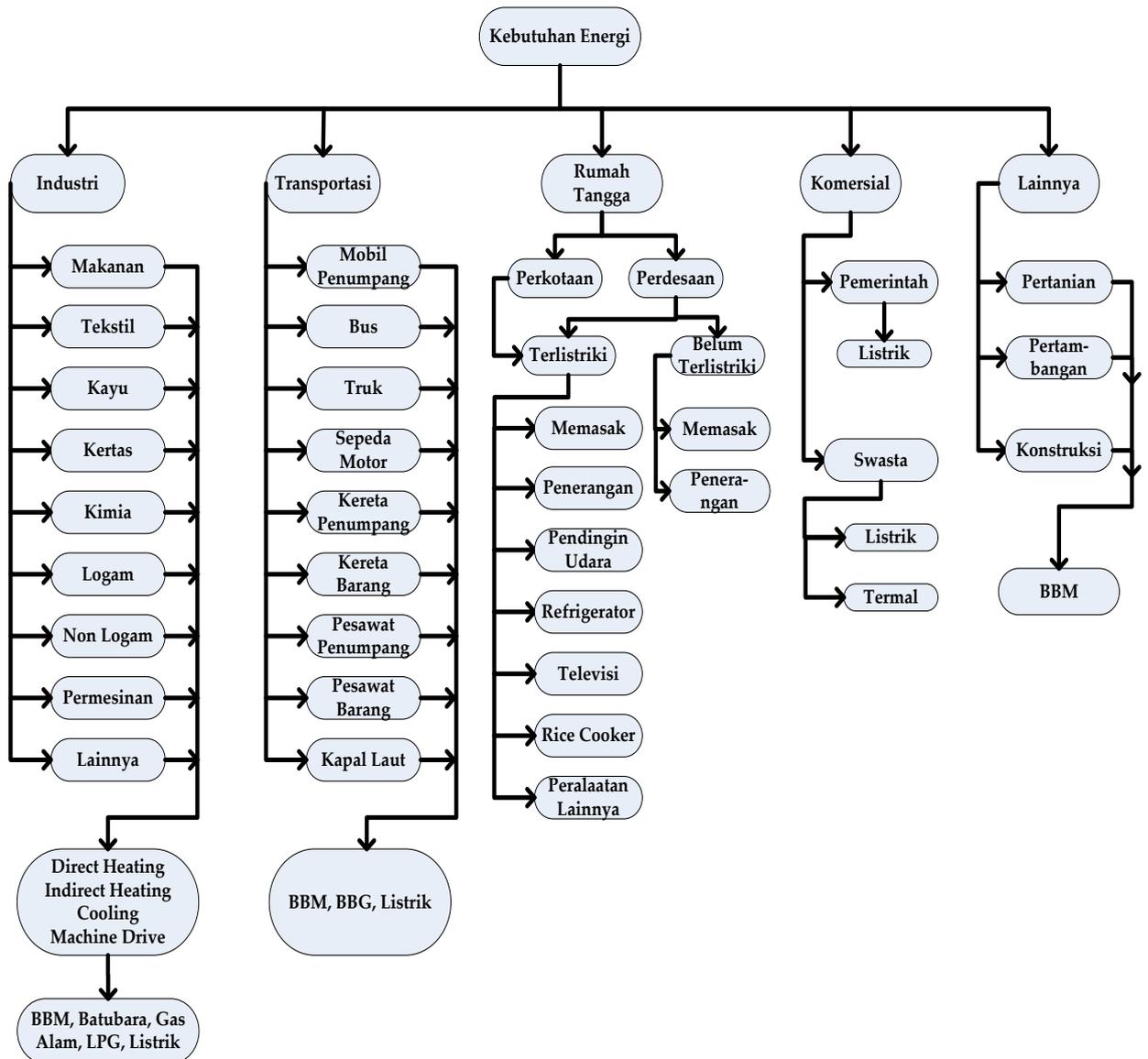
Pada skenario optimasi, pembangkit listrik di *dispatch* berlandaskan *runningcost*. Dengan metode *dispatch* ini, modul pembangkit listrik harus melibatkan *load duration curve* (LDC). Selanjutnya, LEAP akan membuat simulasi *dispatch* setiap tipe proses pembangkit listrik, baik untuk mencukupi permintaan energi listrik yang ditetapkan oleh LDC maupun permintaan energi listrik secara total. *Running cost* ditetapkan dengan persamaan 8 (Suhono et al., 2019).

$$Running\ Cost_i = VariableOMCost_i + \frac{FuelCost_i}{Efficiency_i} \quad (8)$$

2.4. Konfigurasi Pemodelan Kebutuhan Energi Dan Penyediaan Energi

2.4.1. Konfigurasi Pemodelan Kebutuhan Energi

Pada gambar 2.8 diperlihatkan wujud pemodelan kebutuhan energi yang terdiri dari lima sektor, yaitu sektor industri, transportasi, rumah tangga, komersial dan lainnya. Model energi untuk sektor Industri terbagi menjadi 9 subsektor industri, serta dapat juga dikelompokkan menjadi tiga bagian bila dipandang dari intensif energi per unit (Dewan Energi Nasional, 2016), yaitu industri manufaktur yang banyak menggunakan energi, industri manufaktur yang menyerap sedikit energi, dan terakhir adalah industri non manufaktur. Terkait teknologi perangkat industri, secara umum dapat diklasifikasikan menjadi empat jenis, yaitu ketel uap, tungku, chiller, serta pompa dan compressor (Dewan Energi Nasional, 2016).



Gambar 2.8. Pemodelan Kebutuhan Energi Per Sektor (Zaman & Yong, 2021)(Dewan Energi Nasional, 2016)(Yudiartono et al., 2022)

Selanjutnya pemodelan energi sektor transportasi, digolongkan menjadi moda transportasi darat dengan bahan bakar minyak, BBG, dan listrik seperti mobil penumpang, bus, truk, sepeda motor, kereta penumpang dan barang. Berikutnya transportasi laut dengan bahan bakar minyak seperti kapal laut, dan terakhir transportasi udara dengan bahan bakar avtur.

Konfigurasi model energi sektor Rumah Tangga terbagi menjadi dua daerah, perkotaan dan pedesaan. Daerah perkotaan cuma mencakup daerah

berlistrik, sementara daerah pedesaan meliputi daerah berlistrik dan tidak berlistrik, seperti yang terlihat pada gambar 2.8. Permintaan energi sektor rumah tangga yang telah berlistrik dipilah menjadi penerangan, memasak, AC, lemari es, televisi dan peralatan lainnya. Sedangkan untuk wilayah yang belum berlistrik, permintaan energinya hanya dalam bentuk memasak dan penerangan saja.

Konfigurasi model energi pada sektor komersial terbagi menjadi sektor pemerintah dan sektor swasta. Kebutuhan energi pemerintah hanya berupa listrik, sedangkan kebutuhan energi swasta meliputi energi listrik dan energi thermal. Teknologi yang menggunakan energi thermal adalah tungku uap atau pemanas air. Adapun sektor swasta terdiri dari kantor swasta, hotel, sekolah, mall, dan rumah sakit (Dewan Energi Nasional, 2016).

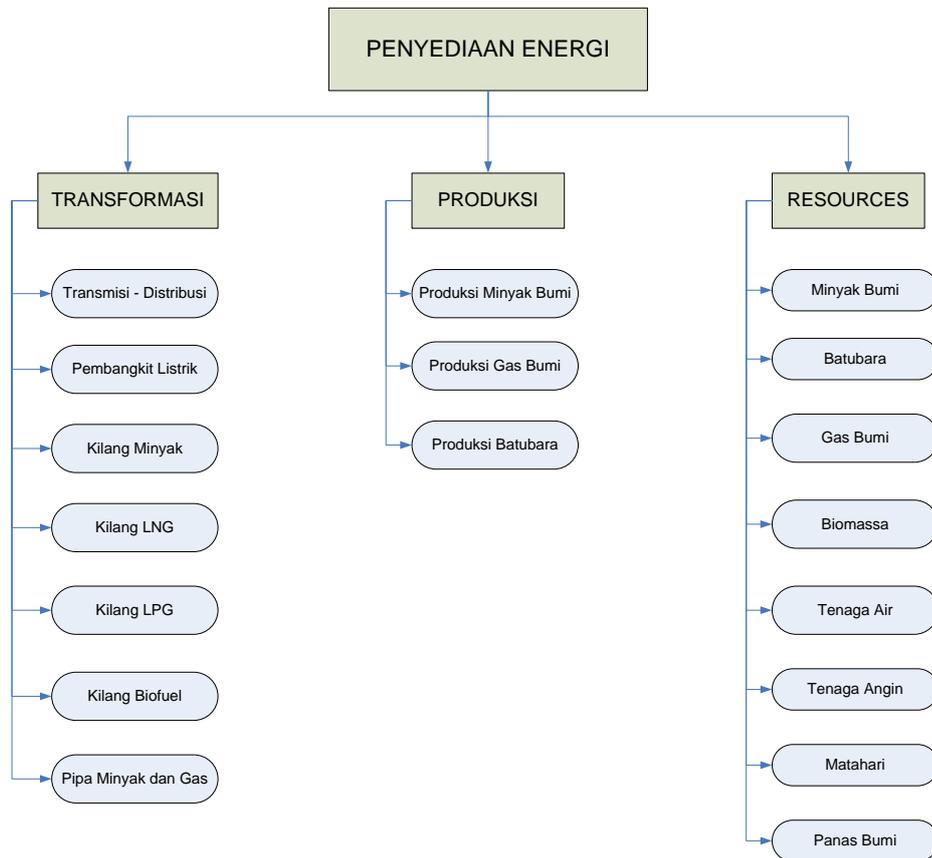
Terakhir adalah pemodelan energi sektor lainnya, terbagi menjadi sektor pertanian, sektor pertambangan dan sektor konstruksi. Kebutuhan energinya sebagian besar masih berupa BBM (Dewan Energi Nasional, 2019).

2.4.2. Konfigurasi Pemodelan Penyediaan Energi

Model penyediaan energi di perangkat lunak LEAP (*the Low Emissions Analysis Platform*) dapat dibagi menjadi 3 bagian, transformasi, produksi dan *resources* (lihat gambar 2.9). Modul Transformasi adalah tempat untuk model pasokan energi, mencakup produksi energi dan penyalurannya, serta terdiri dari energi primer dan energi sekunder. Pasokan energi dalam modul transformasi ini akan secara otomatis mencukupi kebutuhan energi dari modul demand maupun dari target ekspor energi. Susunan modul transformasi adalah berderet dari atas ke bawah menurut rangkaian kedekatannya dengan sisi kebutuhan energi. Misalnya transmisi dan distribusi listrik harus diletakkan di atas pembangkitan listrik, pembangkitan listrik harus diposisikan di atas kilang minyak (bila pembangkit listrik memakai BBM), dst. Modul Transformasi meliputi dua cabang, *processes* dan *output fuels*. Pada pembangkitan tenaga listrik, *processes* yang memuat berbagai tipe pembangkit dengan *output fuels* yang sama yaitu listrik. Pada kilang minyak, masukan kilang hanya minyak mentah dan sebagian kecil gas bumi, tetapi outputnya dapat berupa berbagai jenis BBM dan LPG (Winarno, 2010).

Sumberdaya (*Resources*) merupakan pohon terakhir dalam LEAP. Cabang-cabang dalam pohon sumberdaya ini muncul secara otomatis apabila suatu jenis energi disebutkan dalam pohon kebutuhan atau pohon transformasi. Pohon sumberdaya terdiri atas dua bagian, yaitu primer dan sekunder. Bagian

Primer berisi daftar energi primer, terdiri dari energi fosil dan energi terbarukan. Dalam bagian primer ini terdapat data cadangan dan potensi energi primer. Dalam bagian sekunder, tidak ada data yang harus diisikan.



Gambar 2.9. Pemodelan Penyediaan Energi (Zaman & Yong, 2021)