

BAB II

Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori

2.1 Tinjauan Pustaka

Energi alternatif merupakan energi yang menggantikan energi dengan bahan bakar konvensional, dan energi terbarukan merupakan energi yang memiliki sumber daya tak terbatas atau memiliki siklus alami yang cenderung lebih pendek untuk terus mereproduksi energi tersebut tanpa adanya intervensi yang diberikan oleh manusia. Permasalahan krisis energi yang kini telah menjadi isu global menitik beratkan pada adanya ketidak seimbangan antara permintaan energi yang ada dengan *supply* energi yang tersisa. Hal ini memaksa ilmuwan dunia untuk mencari alternatif energi yang terbarukan untuk dijadikan *supply* energi alternatif agar permintaan energi yang terus meningkat dapat dipenuhi. Salah satu substitusi energi yang sangat potensial untuk dimanfaatkan adalah energi panas bumi.

Kajian mendalam mengenai pemanfaatan energi panas bumi untuk dikonversikan menjadi energi listrik perlu terus dilakukan untuk dapat mengukur nilai ekonomi, nilai efisiensi, nilai ekologi dan nilai-nilai lainnya yang lebih optimal. Oleh karena itu studi potensi pemanfaatan energi panas bumi ini sangat tepat dilakukan guna memberikan pilihan alternatif dalam memenuhi kebutuhan energi kedepannya.

Berdasarkan topik tugas akhir yang diambil, terdapat beberapa referensi penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik tugas akhir ini, berikut beberapa referensi penunjang yang ada:

- a. Bimo Hutomo Adhi, 2018, “Analisis Potensi Energi Terbarukan Terkait Permintaan dan Penyediaan Energi Listrik di Jawa Tengah dengan Aplikasi LEAP” Skripsi, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, menjelaskan tentang analisis potensi energi terbarukan dalam memenuhi kebutuhan energi listrik di Jawa Tengah menggunakan *software* LEAP. Dengan mengolah data

dari Badan Pusat Statistik, PLN, Badan Perencanaan Pembangunan Nasional, dan Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Provinsi Jawa Tengah didapatkan hasil bahwa pada tahun 2025 prakiraan total kebutuhan energi listrik sebesar 28.152,05 GWh dan prakiraan total kapasitas pembangkit listrik energi baru dan terbarukan akan mencapai 2.756,63 MW.

- b. Yusak Tanoto, Ekadewi Anggraini Handoyo, 2014, "*Potensi Energi Panas Bumi di Kabupaten Banyuwang: Studi Awal Model Perencanaan Penyediaan Energi Listrik Jangka Panjang*" dalam Jurnal Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi Sekolah Tinggi Teknologi Nasional (STTNAS) Yogyakarta, memaparkan mengenai potensi pemanfaatan energi panas bumi yang terdapat di daerah Blawan-Ijen yang terletak di perbatasan kabupaten Bondowoso-Banyuwangi untuk penyediaan energi listrik setempat. Perencanaan penyediaan energi listrik jangka panjang tahun 2014-2028 untuk Kabupaten Banyuwangi dimodelkan dengan menggunakan *software* LEAP berdasarkan proyeksi konsumsi energi listrik disemua sector pengguna. Pada tahun 2028 proyeksi akan konsumsi energi listrik di Kabupaten Banyuwangi mencapai 1.863 GWh, meningkat sebesar 190% dibandingkan dengan tahun 2013. Mempertahankan pembangkit yang telah ada sampai tahun 2028, dibutuhkan pasokan daya tambahan sebesar 34,2 GWh dengan biaya total penyediaan energi sebesar US\$ 1,028 miliar. Solusi kompetitif dapat dilakukan dengan pembangunan pembangkit listrik tenaga panas bumi dimana kebutuhan energi telah dapat disuplai oleh gabungan kedua pembangkit dengan biaya US\$ 1,19 miliar disamping adanya penurunan tingkat emisi CO₂ dan penghematan batubara.
- c. B.H.M. Goldy Ompusunggu, Mahesa Ryan Pamuji, Gede Wibawa dan Kuswandi, 2016, "*Studi Perencanaan Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Sebesar 120 MW di Blok Sarulla*", dalam Jurnal Teknik ITS Vol. 5 No. 2, menjelaskan tentang pemanfaatan panas bumi menjadi pembangkit listrik di Blok Sarulla Sumatera Utara

pada tahun 2020. Pabrik pembangkit listrik tenaga *geothermal* ini menggunakan proses *integrated combine cycle*, yang merupakan teknologi paling muktahir dan baik diantara semua teknologi proses pembangkit listrik tenaga *geothermal*. Pada pabrik pembangkit listrik *geothermal* ini menggunakan dua jenis turbin, yaitu turbin uap untuk aliran fluida *geothermal* dan turbin gas untuk aliran *working fluid* iso-petana. Proses *geothermal power plant* ini akan berlangsung secara kontinyu, yaitu 24 jam/hari dan 330 hari/tahun dengan perencanaan sebagai kapasitas produksi 124 MW/tahun dengan bahan baku Feed dan Iso-Petana sebanyak 15448,32 kg/jam dan 1634544 kg/jam. Dan juga dijelaskan analisi berdasarkan pendekatan ekonomi dengan menggunakan metode pendekatan *discount cash flow* yang terdiri dari perhitungan biaya produksi dan aliran kas/kinerja keuangan yang telah dilakukan, menghasilkan nilai *Internal Rate of Return (IRR)* 13,2%, *Pay Back Perido* dengan 6,9 tahun dan BEP sebesar 30,9%.

- d. Andiesta El Fandari, Areif Daryanto, Gendut Suprayitno, 2014, "*Pengembangan Energi Panas Bumi yang Berkelanjutan*", Jurnal Ilmiah Semesta Teknik Vol. 17 No. 1, memaparkan tentang bagaimana keberlanjutan pengembangan energi panas bumi di Indonesia. Pengembangan energi panas bumi sebagai salah satu energi baru dan terbarukan menjadi sangat penting untuk didiskusikan sejalan dengan berkurangnya cadangan energi fosil, fluktuasi harga energi yang dipengaruhi oleh ekonomi global dan keadaan politik dan peningkatan level emisi gas yang disebabkan oleh konsumsi energi fosil.
- e. Handika Roberto Nainggolan dan Eddy Warman, 2016, dalam jurnal yang berjudul, "*Studi Prakiraan Potensi Pembangkit Listrik Panas Bumi di Pusuk Buhit Kelurahan Siogung-ogung Kabupaten Samosir*", Jurnal Singuda Ensikom Vol.14, membahas mengenai prakiraan potensi panas bumi sebagai bahan bakar PLTP pada daerah Pusuk Buhit Kabupaten Samosir. Dengan parameter yang akan dianalisa diantaranya adalah dari aspek teknis, aspek ekonomis serta aspek lingkungan. Pusuk

Buhit Kabupaten Samosir merupakan daerah yang memiliki prakiraan potensi terduga dengan daya sebesar 54,6 MWe dan jumlah pembangkitan energi listrik sebesar 210.240.000 kWh per tahun. Sehingga diharapkan dapat mengatasi kebutuhan energi listrik di sekitar Sumatera Utara.

- f. Daril Ridho Zuchrillah, Renanto Handogo, Juwari, 2017, “*Pemilihan Teknologi Proses Geothermal Secara Teknis Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi di Indonesia*”, Jurnal IPTEK Vol.21 No.2, memaparkan kualitas fisik *steam* yang dihasilkan dari sumur produksi dalam suhu 306 °C dan mempunyai nilai entalpi sebesar 1879,7 kJ/kg. Kondisi operasi separator yang digunakan perangkat lunak EES berada di suhu 179,9 °C dan tekanan 1000 kPa dengan menghasilkan daya listrik sebesar 13.929,62 kWe dengan besarnya efisiensi 23,41%. Telah dikembangkan simulasi pemodelan dengan kombinasi antara *single flash steam* dengan *binary cycle*. Kombinasi teknologi *single flash steam* dan *binary cycle* ini menghasilkan daya sebesar 18.456,24 kW dengan efisiensi *overall plant* sebesar 31,02%. Hal tersebut memiliki efisiensi terbesar sehingga dirujuk sebagai pilihan teknologi proses *geothermal* yang tepat untuk PLTP PT. Geo Dipa Energi unit Dieng, Jawa Tengah.
- g. Atmanto, Lukas Joko Dwi, 2015, “*Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) dan Kendala Pembangunannya*”, Jurnal Polines, menjelaskan mengenai pemanfaatan potensi pembangkit energi listrik dengan bahan baku panas bumi yang baru mencapai angka 4% dengan melihat beberapa kendala yang bersifat teknis dan nonteknis dalam membangun PLTP. Kendala teknis berupa besaran biaya investasi untuk pembangunan infrastruktur jaringan transmisi yang panjang, karena letak antara pembangkit dengan pusat beban sangat jauh. Kendala non teknis berupa perijinan, karena dalam UU eksplorasi panas bumi dimasukkan sebagai kategori pertambangan, sehingga perijinannya berbenturan dengan peraturan lain khususnya pengelolaan kawasan

hutan lindung. Karena itu pemangku kebijakan harus segera mencari solusi yang tepat agar perijinan pembangunan PLTP tidak banyak hambatan, khususnya hambatan non teknis.

- h.* Rishal Asri, 2016, “Proyeksi Jangka Panjang Kebutuhan Energi Sulawesi Selatan Menggunakan Skenario Sistem Energi Bersih”, Tesis, Program Studi Magister Teknik Sistem, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, memaparkan hasil penelitiannya yang bertujuan untuk meningkatkan proyeksi penggunaan energi terbarukan sesuai dengan arah kebijakan energi nasional terkait bauran energi untuk energi terbarukan pada tahun 2025 sebesar 23% dan pada tahun 2050 sebesar 31%. Pada penelitiannya untuk memproyeksikan penggunaan energi terbarukan menggunakan aplikasi LEAP, dibutuhkan data produk domestik regional bruto, konsumsi listrik, konsumsi bahan bakar minyak, dan indikator energi lainnya. Berdasarkan hasil penelitian, pada tahun 2050 sumber energi fosil untuk kebutuhan energi yang digunakan adalah minyak bumi sebesar 80,21 juta SBM, batubara 27 juta SBM, dan gas alam 14,28 juta SBM, sedangkan untuk energi terbarukan hanya sebesar 23,1 juta SBM.
- i.* Lukman Juliantoro, 2017, “Analisis Aplikasi Energi Terbarukan Pada Permintaan dan Penyediaan Energi Listrik Serta Penurunan Emisi di Jawa Timur”, Skripsi, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, menjelaskan mengenai usaha antisipasi dari kondisi elektrifikasi, dan pertumbuhan ekonomi agar ketersediaan listrik dapat tersedia dalam jumlah yang cukup. Analisis dan prakiraan ini merupakan salah satu usaha atau solusi yang dapat diterapkan untuk mengantisipasi penyediaan dan permintaan energi listrik di Jawa Timur, agar upaya pemanfaatan energi baru dan terbarukan serta usaha menjaga kelangsungan pelestarian alam dapat dilakukan.

2.2 Sumber Daya Energi Terbarukan

Kata energi berasal dari bahasa Yunani *energia*. Seorang ilmuwan Perancis, Jean V. Poncelet, pada tahun 1892 memberikan definisi energi sebagai kemampuan untuk melakukan kerja. Kita selalu menggunakan energi dalam kehidupan sehari-hari, baik secara langsung maupun tidak langsung. Pada tingkat paling dasar, keragaman bentuk energi dapat diturunkan menjadi empat bentuk yaitu energi kinetik, energi gravitasi, energi listrik, dan energi nuklir (Syahputra:2016).

Kebutuhan energi yang terus naik, seiring dengan bertambahnya jumlah manusia, mengharuskan kita untuk mencari sumber energi yang dapat diperbarukan. Sumber energi fosil yang kita kenal, seperti minyak bumi, batubara, dan gas adalah sumber energi yang pada suatu saat akan habis. Misalkan, minyak bumi di Indonesia jika tidak diketemukan cadangan minyak baru, menurut para ahli, akan habis digunakan atau dikonsumsi dalam waktu 20 hingga 40 tahun mendatang. Pemenuhan energi yang tinggi, terutama di negara-negara industri dengan mengandalkan energi fosil, telah memberikan dampak yang tidak baik, yaitu terjadinya pemanasan global, pencemaran lingkungan, dan perubahan cuaca. Saat ini para ahli energi di dunia sedang gencar untuk mencari energi terbarukan yang dapat memberikan efek positif. Beberapa energi terbarukan telah mengalami perkembangan yang pesat dan telah berskala industri seperti energi matahari, energi panas bumi dan energi angin. Energi terbarukan yang telah lama dimanfaatkan manusia dalam skala besar adalah energi air. Namun demikian, ada juga yang masih dalam taraf penelitian seperti energi dari laut dan pembawa energi sel bahan bakar.

Menurut Ramadoni Syahputra (2016), energi terbarukan dapat didefinisikan sebagai energi yang diperoleh dari arus terus menerus atau berulang-ulang energi berulang dalam lingkungan alam. Atau sebagai aliran energi yang diisi ulang pada tingkat yang sama seperti yang digunakan. Selain itu, asal muasal dari besaran dan sumber energi baru dan terbarukan yang ada di bumi, berasal dari pancaran radiasi matahari.

Berikut adalah jenis energi terbarukan dan pembawa energi yang ramah lingkungan (sel bahan bakar):

- Energi panas bumi (*geothermal*),
- Energi matahari (*solar*),
- Energi biomassa (*biomass*),
- Energi air (*hydro*),
- Energi laut (*ocean*),
- Energi angin (*wind*),
- Pembawa energi sel bahan bakar (*fuelcell*).

Permintaan dan kebutuhan akan energi yang terus meningkat memaksa kita untuk berinovasi dalam teknologi dan menemukan sumber energi baru. Salah satunya adalah teknologi energi panas bumi. Saat ini kita telah mempunyai beberapa pembangkit listrik tenaga panas bumi (disingkat menjadi PLTP). PLTP ini tersebar di Sumatera, Jawa, Bali, Nusa Tenggara dan Sulawesi. Masih banyak daerah yang mempunyai potensi energi panas bumi tetapi belum dimanfaatkan secara optimal. Oleh karena itu, ditengah kebutuhan energi yang melonjak dan harga minyak bumi yang meroket, saat ini merupakan saat yang tepat untuk mengembangkan energi terbarukan panas bumi. Sumber energi berkelanjutan dan ramah lingkungan yang langsung disediakan olah alam melalui proses natural bumi. Dengan menggunakan teknologi dan manajemen pemanfaatan yang baik, bukan tidak mungkin energi baru dan terbarukan panas bumi dapat menjadi salah satu alternatif pengganti energi fosil yang sudah mulai langka.

Selain itu pemanfaatan energi panas bumi dapat menekan penggunaan bahan bakar fosil yang memiliki kosekuensi sangat merugikan bagi lingkungan. Contoh konsekuensi merugikan dari penggunaan enegri fosil untuk pemenuhan kebutuhan dan permintaan energi dalam skala kecilnya adalah polusi udara dan hujan asam. Sedangkan dalam skala global yang lebih besar dapat menyebabkan perubahan iklim yang dipengaruhi oleh konsentras emisi gas-gas rumah kaca di atmosfer akibat dari pembakaran bahan bakar fosil.

2.3 Energi Panas Bumi

Menurut Arief Himawan (2017), energi panas bumi atau *geothermal* berasal dari kata Yunani yang berarti *geo* adalah bumi dan *thermal* yang berarti panas. Jadi, energi panas bumi berarti energi atau kekuatan yang diekstrak dari bawah bumi. Energi di dalam bumi terbentuk oleh peluruhan mineral dan hutan beberapa tahun yang lalu. Energi panas bumi disebut sumber energi terbarukan karena panas terus diproduksi di dalam bumi. Indonesia dikaruniai sumber panas bumi yang berlimpah karena banyaknya gunung berapi dari pulau-pulau besar yang ada, hanya pulau Kalimantan saja yang tidak mempunyai potensi panas bumi. Namun besarnya potensi yang dimiliki belum dapat dimanfaatkan secara optimal, dimana hanya 4-5% dari total energi 29.544 MW yang telah digunakan. Hal ini tentu memiliki implikasi yang sangat serius untuk Indonesia kedepannya, dengan perkembangan teknologi dan industri yang pesat, kebutuhan akan energi pun berjalan beriringan dengan pertumbuhan permintaanya.

Perkembangan peradaban manusia yang pesat pada abad 21 ini tidak lepas dari peranan energi yang menunjang setiap lini kehidupan manusia. Mulai dari aktivitas individual hingga aktivitas massal, selalu ada energi yang dibutuhkan. Sesuai dengan data yang dikeluarkan oleh Dewan Energi Nasional (2016:16), “Total kebutuhan energi sektoral tahun 2015 adalah 876.594 ribu SBM (tanpa biomasa tradisional). Sektor transportasi merupakan pengguna terbesar kemudian disusul industri non energi, rumah tangga, komersial dan sector lainnya.”

Sedangkan berdasarkan pengarang yang sama Dewan Energi Nasional (2015:15), “Cadangan minyak bumi nasional per 1 Januari 2014, baik berupa cadangan terbukti maupun cadangan potensial mengalami penurunan 2,3% jika dibandingkan tahun sebelumnya. Cadangan potensial minyak pada tahun 2015 sebanyak 3,75 miliar barel, sedangkan cadangan terbukti sebanyak 3,62 miliar barel. Oleh karenanya, perlu ada alternatif energi primer yang tetap bisa mendukung perkembangan peradaban manusia menuju kearah yang lebih baik, atau lebih sering dikenal dengan energi baru dan terbarukan. Energi Panas Bumi merupakan salah satu alternatif energi baru dan terbarukan yang dimiliki oleh Indonesia.

2.3.1. Proses Pembentukan Energi Panas Bumi

Menurut Prashanti Amelia (2010), secara garis besar bumi ini terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu kulit bumi (*crust*), selubung bumi (*mantle*) yang diperkirakan mempunyai ketebalan sekitar 2900 km, dan inti bumi (*core*) yang memiliki ketebalan sampai dengan sekitar 3450 km. Sebagai bagian terluar dari bumi, kulit bumi memiliki ketebalan yang bervariasi untuk kulit bumi yang berada di bawah suatu lautan dengan kulit bumi yang berada di permukaan. Ketebalan kulit bumi di bawah suatu daratan berkisar 35 km dan yang di bawah lautan hanya berkisar 5 km. Temperatur pada inti bumi diperkirakan dapat mencapai sekitar 7000 F atau bahkan lebih.

Energi Panas Bumi atau *geothermal* merupakan salah satu energi primer yang banyak terkandung dalam inti bumi. Energi dalam bentuk kalor alami ini telah lama tersimpan selama ribuan tahun dalam bentuk gunung berapi, aliran lava, sumber air panas, dan *geyser*. Energi ini terbentuk dari proses interaksi 3 lempengan aktif yang mengelilingi Indonesia, dari mulai pulau Sumatera, Jawa, hingga ke Sulawesi. Lempeng-lempeng tersebut merupakan bentangan batuan setebal 64-145 km yang mengapung di atas astenosfer. Semua lempengan yang ada ini bergerak secara perlahan dan terus-menerus. Di beberapa lokasi lempeng – lempeng ini bergerak memisah sedangkan di lokasi yang berbeda lempeng ini bertemu atau berinteraksi. Interaksi berlangsung dalam bentuk tumbukan antar lempengan yang pada akhirnya menimbulkan zona penujaman (subduksi) pada kedalaman tertentu.

Keluaran dari zona penujaman akan menyebabkan proses magmatis dan melahirkan gunung-gunung api aktif pada lempengan yang memiliki massa lebih rendah, sehingga lempeng tersebut akan bergerak ke atas berbanding terbalik dengan lempengan yang memiliki massa lebih berat akan bergerak turun ke mantel bumi. Zona subduksi ini hanya terjadi pada batas lempeng yang bersifat konvergen atau batas antar lempeng tektonik yang saling mendekat. Pada zona subduksi dikarenakan panas di dalam astenosfere dan panas akibat gesekan, ujung dari lempengan tersebut akan hancur meleleh dan mempunyai temperatur yang sangat tinggi hingga melahirkan gunung aktif seperti penjelasn proses magamatis.

Sistem Panas Bumi yang ada di Indonesia umumnya merupakan sistem *hydrothermal* yang mempunyai *temperature* tinggi ($>225^{\circ}\text{C}$), hanya beberapa diantaranya yang mempunyai *temperature* sedang ($150^{\circ}\text{-}225^{\circ}\text{C}$). Pada dasarnya sistem panas bumi jenis *hydrothermal* ini terbentuk sebagai hasil perpindahan panas dari suatu sumber panas sekelilingnya yang terjadi secara konduksi dan secara konveksi. Perpindahan panas secara konduksi terjadi melalui melalui batuan *igneous* (batuan vulkanik) yang terbentuk karena magma panas yang berada didekat permukaan. Sedangkan proses perpindahan panas secara konveksi terjadi karena adanya kontak antara air dengan suatu sumber panas.

Air tanah yang dipengaruhi oleh gravitasi akan memiliki kecenderungan untuk selalu bergerak kebawah, akan tetapi dengan adanya kontak antara air dengan sumber panas maka akan terjadi perpindahan kalor sehingga air memiliki *temperature* yang lebih tinggi dan air akan menjadi lebih ringan ataupun berubah dalam bentuk uap (*steam*) panas. Hal ini akan menyebabkan air dengan *temperature* tinggi dan massa yang ringan akan bergerak ke atas melalui batuan berpori dan *permeable* di atas lapisan *igneous*, dan air dengan *temperature* rendah dan massa yang berat akan bergerak ke bawah, sehingga terbentuklah sirkulasi air atau arus konveksi. Proses perpindahan kalor pada air ini terjadi melalui sebuah medium tempat terperangkapnya air tanah yang disebut dengan *reservoir*.

Didalam *reservoir*, air dan dalam bentuk steam beserta panasnya terperangkap oleh lapisan batuan padat. Namun bagaimanapun batuan padat ini tetap memiliki retakan yang pada akhirnya berfungsi sebagai katup pada sebuah *broiler* alami dengan ukuran yang sangat besar. Katup ini seringkali ditunjukkan dengan adanya manifestasi panas bumi di permukaan (*geothermal surface manifestation*), seperti kubangan lumpur panas (*mud pools*), mata air panas, *geyser* dan manifestasi panas bumi lainnya yang juga menunjukkan adanya suatu sistem *hydrothermal* dibawah permukaan bumi. Melalui sistem *hydrothermal* inilah dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi sebuah pembangkit listrik tenaga panas bumi dengan membuat sumur yang mengalirkan *steam* dari *reservoir* menuju selang-selang yang mengarah ke turbin dengan tujuan memberikan gerakan putar pada turbin dimana gerak putar tersebut dihubungkan dengan

generator hingga akhirnya dapat membangkitkan energi listrik. Sistem panas bumi yang tersedia dalam perut bumi memiliki besaran *temperature* fluida yang berbeda-beda di setiap lokasi.

Hochstein (1990), membedakan sistem panas bumi berdasarkan pada besaran temperaturnya menjadi tiga jenis, yaitu:

- a. Sistem panas bumi bertemperatur rendah, yaitu suatu sistem yang *reservoir*-nya mengandung fluida dengan *temperature* lebih kecil dari 125°.
- b. Sistem/*reservoir* bertemperatur sedang, yaitu suatu sistem yang *reservoir*-nya mengandung fluida bertemperatur antara 125°C dan 225°C.
- c. Sistem/*reservoir* bertemperatur tinggi, yaitu suatu sistem yang *reservoir*-nya mengandung fluida bertemperatur di atas 225°C.

2.3.2. Keunggulan Energi Panas Bumi

Untuk pemenuhan kebutuhan energi primer, secara umum energi panas bumi bisa memberikan kontribusi yang baik bila dibandingkan energi fosil lainnya. Lebih lanjut, jika dilihat dari aspek teknik, ekonomi dan lingkungan, energi panas bumi mempunyai banyak keuntungan, diantaranya sebagai berikut:

- a. Energi panas bumi adalah energi terbarukan yang ramah lingkungan, tidak mengeluarkan polusi atau limbah.
- b. PLTP memerlukan lahan lebih sedikit dibandingkan dengan PLTU. Sebagai contoh, PLTP hanya memerlukan 3,2 ha per MW, sedangkan PLTU batubara membutuhkan 7,7 ha per MW.
- c. Pengembangan PLTP bisa dilakukan bertahap. Artinya, investasi PLTP bisa dilakukan dari skala 5-10 MW. Selanjutnya sesuai dengan kebutuhan dan kemampuan finansial, potensi energi panas bumi di daerah tersebut akan dimanfaatkan hingga kapasitas maksimal.

- d. Energi panas bumi dapat diandalkan sebagai pemasok energi primer karena energi ini selalu tersedia, tidak bergantung pada musim dan siang atau malam hari.
- e. PLTP mengurangi biaya impor BBM yang selama ini digunakan untuk operasional PLTD.
- f. Pembangunan PLTP bisa menggairahkan kegiatan ekonomi lokal.
- g. PLTP tidak mengakibatkan terjadinya degradasi mutu lingkungan, dikarenakan dalam sebuah PLTP tidak ada penambangan yang dilakukan di permukaan, tidak ada tumpahan minyak, dan tidak ada penggenangan akibat dari proses yang dijalankan.

2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)

Pembangkit Listrik merupakan sebuah industri yang memproduksi dan membangkitkan energi listrik dari berbagai macam sumber tenaga, seperti batu bara, minyak bumi, air, panas matahari, nuklir, hingga panas bumi. Pembangkit ini merubah energi-energi primer yang digunakan melalui sebuah mekanisme tersendiri hingga menjadi energi sekunder tenaga listrik. Untuk pemanfaatan energi panas bumi menjadi energi listrik, perlu dilakukan kegiatan penambangan berupa eksplorasi dan eksploitasi guna memindahkan energi panas yang tersedia dalam perut bumi ke permukaan melalui sumur produksi atau pengembangan. Energi panas yang telah dipindahkan ke permukaan tersebut akan dialirkan ke sebuah pembangkit listrik dan setelah itu uap panas tadi akan dialirkan kembali menuju perut bumi melalui sumur-sumur injeksi, begitulah mekanisme kerja secara umum yang berjalan pada sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP).

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (*Geothermal Power Plant*) merupakan sebuah pembangkit listrik yang memanfaatkan hasil dari pemanasan dari inti bumi dalam sebuah *reservoir* atau *boiler* raksasa yang menghasilkan *steam* dengan *temperature* dan tekanan yang tinggi untuk kemudian dirubah menjadi energi listrik. Pada prinsipnya Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) sama dengan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dimana, uap lah

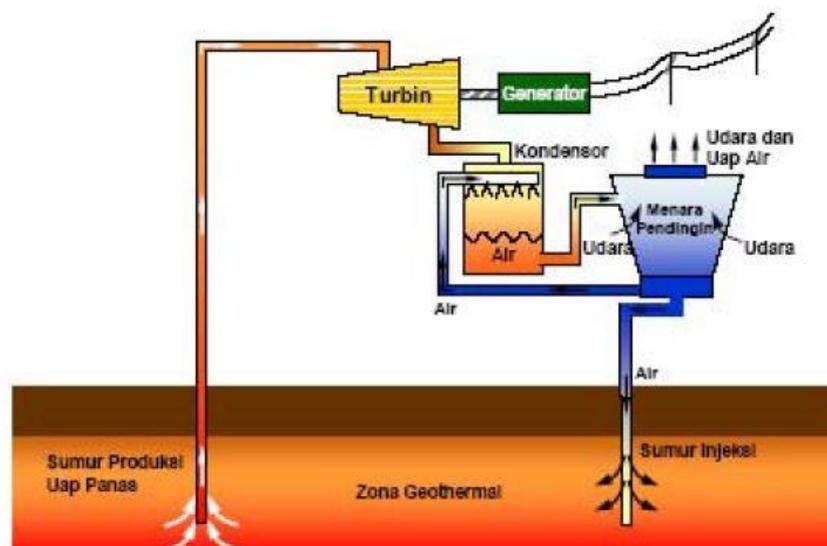
yang digunakan untuk menggerakkan turbin, yang selanjutnya energi mekanik dari gerakan turbin tersebut akan dihibungkan untuk membangkitkan listrik pada generator, uap panas yang tersisa akan dikembalikan menuju *reservoir* melalui saluran-saluran yang dibuat. Dengan demikian proses pembangkitan energi listrik pada PLTP sama sekali tidak menghasilkan limbah buang.

2.4.1 Teknologi Pada Pembangkit Listrik Panas Bumi (PLTP)

Berdasarkan teknologi yang digunakan terdapat 3 teknologi yang umum digunakan pada sebuah *geothermal power plant*, yaitu:

a. *Dry Steam Power Plant*

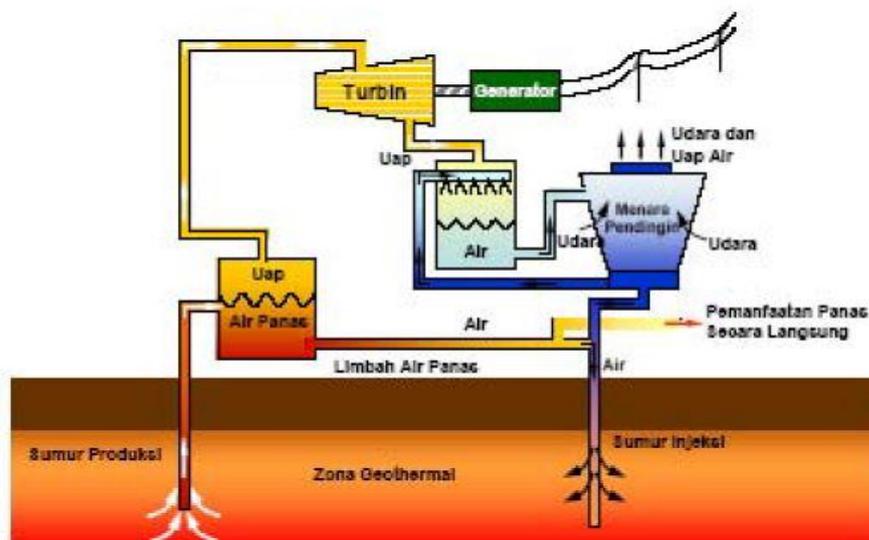
Teknologi yang pertama kali digunakan pada sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) atau *Geothermal Power Plant* adalah *dry steam power plant*. Teknologi ini digunakan *geothermal power plant*, yang berlokasi di Lardarello, Italia, pada 1904. Teknologi memanfaatkan *steam* yang langsung dialirkan menuju turbin dan mengaktifkan generator untuk bekerja menghasilkan tenaga listrik. Sisa panas yang datang dari *production well* akan dialirkan kembali menuju *reservoir* melalui *injection well*. Skema mengenai PLTP dengan menggunakan teknologi *Dry Steam* dapat dilihat pada gambar 2.1



Gambar 2.1 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi dengan Teknologi *Dry Steam*

b. *Flash Steam Power Plant*

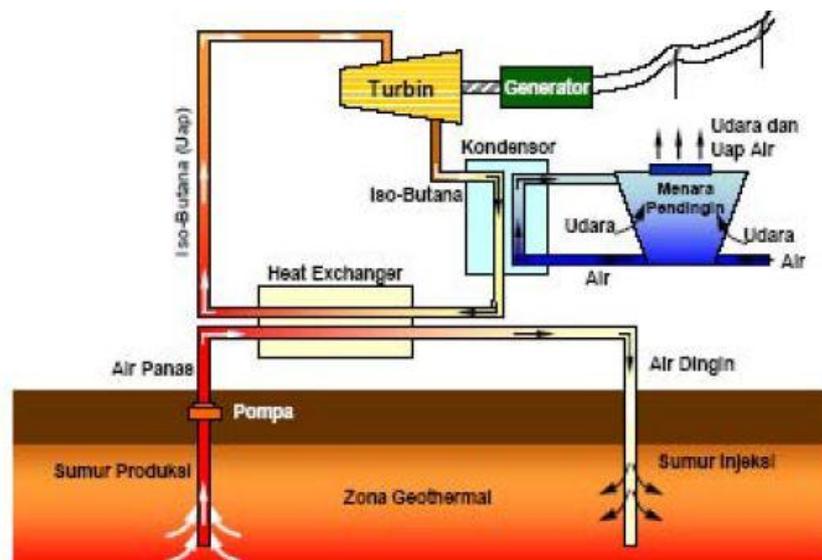
Dalam pembangkitan sebuah energi listrik dengan memanfaatkan sumber daya energi baru dan terbarukan panas bumi atau *geothermal*, teknologi berikutnya yang biasa digunakan pada sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) adalah teknologi *flash steam power plant*. Teknologi *flash steam power plant* memanfaatkan panas bumi yang berupa fluida misalnya air panas alam (*hot spring*) dengan suhu diatas 175°C . Perbedaan teknologi *flash steam power plant* dengan *dry steam power plant* adalah pada teknologi *flash steam power plant* fluida panas dialirkan kedalam tangki *flash* yang memiliki tekanan lebih rendah sehingga terjadi uap panas secara cepat, sedangkan pada teknologi *dry steam power plant* uap panas langsung dialirkan menuju turbin. Uap panas inilah yang kemudian dialirkan menuju turbin dan menggerakannya sehingga mengaktifkan generator yang menghasilkan tenaga listrik. Serupa dengan teknologi *Dry Steam Power Plant*, sisa panas yang dihasilkan dari proses pengaktifan tenaga listrik pada *Flash Steam Power Plant* akan dikembalikan menuju *reservoir* melalui *injection well*. Berikut skemanya ditampilkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi dengan Teknologi *Flash Steam*

c. *Binary Cycle Power Plant*

Selain menggunakan kedua teknologi yang sudah dijelaskan sebelumnya yaitu teknologi *dry steam power plant* dan *flash steam power plant*, terdapat juga teknologi ketiga yang digunakan PLTP untuk membangkitkan energi listrik, yaitu BCCP atau *Binary Cycle Power Plant*. Pada BCCP air panas atau uap panas yang berasal dari sumur produksi (*production well*) tidak pernah menyentuh turbin. Air panas bumi digunakan untuk memanaskan apa yang disebut dengan *working fluid* pada *heat exchanger*. *Working fluid* kemudian akan berubah menjadi panas dan menghasilkan uap berupa *flash*. Uap yang dihasilkan di *heat exchanger* tadi lalu dialirkan untuk memutar turbin dan selanjutnya menggerakkan generator untuk menghasilkan sumber daya listrik. Uap panas yang dihasilkan di *heat exchanger* inilah yang disebut sebagai *secondary (binary) fluid*. BCCP ini sebetulnya merupakan sistem tertutup sehingga tidak ada yang dilepaskan ke atmosfer. Untuk mendapatkan visualisasi yang lebih jelas, skema pembangkitannya dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi dengan Teknologi *Binary Cycle*

2.4.2 Tahapan Pengembangan Energi Panas Bumi

Untuk memanfaatkan potensi energi panas bumi pada suatu wilayah yang memiliki kriteria geologis untuk pembangkit panas bumi (*geothermal power plant*) harus melalui kajian dengan seksama guna meminimalisir kegagalan atau resiko tidak ditemukannya sumber panas bumi yang ideal untuk dikonversi menjadi energi listrik. Hal ini dikarenakan terdapat beberapa ketentuan mengenai kondisi sumur yang dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan energi listrik. Menurut Nugraha, Sunardi (2012), beberapa pertimbangan pemilihan panas bumi yang layak digunakan untuk pembangkit adalah sebagai berikut:

- Mempunyai *temperature* yang tinggi di atas 200°C,
- Mempunyai kandungan air/uap panas atau cadangan yang besar sehingga mampu dioperasikan dalam jangka waktu yang cukup lama, yaitu sekitar 25-30 tahun,
- Menghasilkan fluida (uap panas) yang mempunyai pH hampir netral agar tidak cepat terjadi kerusakan korosi pada peralatan,
- *Reservoir* panas bumi tidak berada terlalu dalam dari permukaan bumi, biasanya tidak lebih dari 3 km sehingga biaya pengeboran bisa ditekan,
- Berada di daerah yang relative tidak sulit dicapai. Ini sebagai pertimbangan agar pembangunan PLTP mudah dilakukan karena adanya akses transportasi yang layak,
- Tidak terletak di daerah berpotensi gempa bumi yang tinggi.

Oleh sebab itu, dalam mengembangkan energi panas bumi untuk dibangkitkan menjadi energi listrik perlu memperhatikan tahapan-tahapan yang sangat penting untuk dilakukan guna menunjang hasil ideal yang sesuai dengan perencanaan dan perhitungan yang dibuat. Mulai dari faktor ekonomi berkaitan dengan efektifitas dan efisiensi pengembangan, dampak-dampak yang akan ditimbulkan nantinya, hingga faktor teknis lainnya. Berikut merupakan tahapan umum pengembangan panas bumi yang ditulis oleh Nugraha dan Sunardi (2012).

a. Studi Awal

Studi awal kaitanya dalam tahapan untuk mengembangkan potensi energi panas bumi atau *geothermal* merupakan studi yang dilakukan guna mendapatkan atau mendeteksi sumber-sumber panas bumi secara dini. Salah satu proses dari studi awal adalah secara *visual* akan dilakukan pendataan mengenai apa-apa saja fenomena yang memang menunjang adanya sumber panas bumi pada lokasi yang diduga memiliki sumber panas bumi untuk dibangkitkan sebagai energi listrik, seperti salah satunya adalah adanya mata air panas, maupun manifestasi permukaan lainnya yang timbul akibat potensi panas yang dimiliki. Beberapa kegiatan yang perlu dilakukan dalam studi awal adalah sebagai berikut:

- 1) Menentukan wilayah/daerah panas bumi,
- 2) Mengumpulkan data geologi,
 - Data lokasi (lokasi secara umum, terutama data profil *seismic*, tes hidraulik dan *temperature*),
 - Susunan geologi (potongan geologi pada daerah tersebut, *interpretasi profil seismic*),
 - Lokasi keberadaan air tanah,
 - Prediksi pertama potensi *temperature* yang akan diperoleh,
 - Prediksi debit air panas,
 - Studi hidro kimia,
 - Mempelajari perizinan pemanfaatan sumber panas bumi.
- 3) Penggunaan energi panas bumi,
 - Rencana pemanfaatan energi panas bumi secara langsung (air panas),
 - Rencana pemanfaatan pembangkit listrik.
- 4) Membuat konsep dasar alat atau pembangkit panas bumi,
 - Menentukan jenis dan jumlah pengeboran,
 - Mendirikan fasilitas di permukaan lokasi.
- 5) Membuat perkiraan biaya.

b. Studi Kelayakan

Berikutnya setelah dilakukannya studi awal dan didapatkan informasi yang menunjukkan tanda-tanda positif akan keberadaan sumber panas bumi, maka selanjutnya dilakukan studi kelayakan. Fase ini atau studi kelayakan memiliki peranan sangat menentukan karena berdasarkan data studi kelayakanlah dapat disimpulkan apakah akan diteruskan menuju fase eksplorasi atau tidaknya sebuah proyek pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP). Dalam pelaksanaannya studi kelayakan akan memerlukan biaya yang sangat tinggi untuk membayar para professional menghitung dan mengkaji kelayakannya. Selain itu, dalam studi kelayakan-pun analisis resiko juga perlu dilakukan. Dari hasil analisis resiko dapat dilakukan mitigasi untuk menghindari kejadian-kejadian yang tidak diinginkan, seperti tanah longsor, maupun dampak pada kerusakan bangunan di daerah sekitarnya akibat dari dilakukannya eksplorasi/pengeboran. Secara lebih mendetail, berikut merupakan kegiatan-kegiatan yang dilakukan pada saat studi kelayakan berkaitan dengan pengembangan energi panas bumi atau *geothermal*:

- 1) Melakukan kriteria 1-4 sebagaimana yang tercantum pada studi awal. Perbedaannya adalah dalam fase studi kelayakan hal tersebut dilakukan lebih terperinci dan jelas,
- 2) Menghitung biaya investasi,
 - Eksplorasi,
 - Fasilitas di bawah tanah,
 - Fasilitas dipermukaan tanah.
- 3) Kajian aspek ekonomi,
 - Biaya operasional,
 - Pengeluaran,
 - Perhitungan ekonomi.
- 4) Analisa resiko,
- 5) Analisis lingkungan,
- 6) Rencana jalannya proyek.

c. Eksplorasi

Setelah pada fase sebelumnya dilakukan studi kelayakan dengan hasil yang mendukung untuk dilanjutkan ke fase berikutnya, maka berlanjutlah ke fase eksplorasi. Dimana fase eksplorasi ditandai dengan kegiatan pengeboran pada lokasi-lokasi yang sudah ditentukan berdasarkan hasil dari studi kelayakan. Dalam pengeboran untuk panas bumi teknik pengeboran yang digunakan kurang lebih sama seperti pada teknik pengeboran minyak ataupun gas. Pada fase eksplorasi termasuk didalamnya adalah pengeboran, kebutuhan biayanya sangatlah besar, bahkan bisa mencapai 30-40% dari suatu proyek pembangunan PLTP, namun itu semua bergantung pada kerasnya bebatuan di perut bumi, dan kedalamannya. Selain itu juga dipengaruhi oleh proses eksplorasi guna mendapatkan titik sumur-sumur yang memiliki potensi paling ideal untuk membangkitkan energi listrik. Untuk pengeboran dapat digunakan tiga jenis mata bor, yaitu mata bor putar, mata bor intan, dan mata bor inti, tergantung dengan tingkat kekerasan jenis batuan yang dihadapi. Untuk menggerakkan atau memutar mata bor, diatasnya dihubungkan dengan pipa atau batang. Selanjutnya guna mencegah adanya tanah jatuh ke lubang yang sudah di bor atau air tanah menuju lubang, lubang diberi selubung yang terbuat dari baja keras. Setelah melalui beberapa tes dan simulasi, jika semua parameter dinyatakan baik, dapat dikatakan sumber energi panas bumi ditemukan. Kegiatan yang mencakup fase eksplorasi ialah:

- 1) Mengajukan izin proyek,
- 2) Eksplorasi geofisika jika diperlukan,
- 3) Konsep pengeboran,
- 4) Pengeboran,
- 5) Melakukan tes hasil pengeboran,
- 6) Melakukan simulasi dari data pengeboran,
- 7) Keputusan: penemuan sumber panas bumi.

d. Fasilitas PLTP (Pembangunan)

Fase terakhir dari pengembangan energi panas bumi sebagai pembangkit listrik adalah fase pembangunan fasilitas PLTP. Setelah sebelumnya dilakukan studi awal, studi kelayakan, dan eksplorasi, maka selanjutnya yang perlu dilakukan adalah pembangunan PLTP itu sendiri atau alat pemanfaatan panas bumi lainnya. Dalam fase pembangunan pembangkit diperlukan waktu yang cukup lama, bisa mencapai 2-3 tahun untuk menyelesaikannya. Pada fase pembangunan Pembangkit Listrik Panas Bumi (PLTP) meliputi beberapa hal berikut:

- 1) Melakukan sisa pengeboran,
- 2) Melakukan tes dari sumur-sumur baru, disertai simulasinya,
- 3) Mengajukan pembangunan PLTP,
- 4) Melakukan pembangunan,
- 5) Produksi.

2.5 LEAP

The Long-range Energi Alternatives Planning atau yang selanjutnya lebih dikenal dengan LEAP merupakan sebuah *software* sebagai alat bantu dalam perencanaan atau pemodelan energi-lingkungan. Adanya sistem antarmuka (*interface*) yang menarik dan memberikan kemudahan dalam penggunaannya serta tersedia secara cuma-cuma (*freeware*) bagi masyarakat negara berkembang merupakan beberapa keunggulan dari LEAP. LEAP dikembangkan oleh *Stockholm Environment Institute*, dimana kantor pusatnya berlokasi di Boston, Amerika Serikat.

Metodologi pemodelan yang digunakan dalam aplikasi LEAP adalah akunting (*accounting*), yang mana menggunakan asumsi skenario yang diinginkan oleh pengguna. Skenario tersebut didasarkan pada perhitungan dari proses pengkonversian bahan bakar menjadi energi hingga konsumsi energi masyarakat. LEAP merupakan model yang mempertimbangkan penggunaan akhir energi (*end-use*), sehingga memiliki kemampuan untuk memasukkan berbagai macam

teknologi dalam penggunaan energi, termasuk didalamnya adalah cabang teknologi untuk sebuah pembangkit listrik.

Dengan menggunakan aplikasi LEAP, kita dapat melakukan analisa secara cepat dari sebuah kebijakan energi ke sebuah analisa hasil dari penerapan kebijakan tersebut, hal ini dikarenakan LEAP mampu berfungsi sebagai *database*, sebagai sebuah alat peramal (*forecasting tool*) dan sebagai alat analisa terhadap kebijakan energi. Pengertian dari berfungsi sebagai *database* adalah LEAP menyediakan informasi energi yang lengkap. Sebagai sebuah alat peramal, LEAP mampu membuat proyeksi permintaan dan penyediaan energi dalam jangka waktu tertentu sesuai dengan keinginan pengguna. Dan yang terakhir sebagai alat analisa terhadap kebijakan energi, LEAP memberikan pandangan hasil atas efek dari ide kebijakan energi yang akan diterapkan dari sudut pandang penyediaan dan permintaan energi, ekonomi, dan lingkungan.

2.5.1 Pendekatan Pemodelan LEAP

Pada aplikasi LEAP pendekatan yang digunakan adalah struktur pemodelan dengan pendekatan *accounting framework*. Struktur ini dapat digunakan untuk membuat model sistem energi dengan variabel-variabel tentang deskripsi fisik sistem energi, biaya, dan dampak lingkungan. Selain mensimulasikan kebijakan di sisi permintaan dan penyediaan energi, LEAP juga dapat digunakan untuk menganalisis dampak dari implementasi kebijakan-kebijakan tentang energi. Oleh karena, dengan menggunakan pendekatan *accounting framework* dapat dianalisis implikasi dari penerapan berdasarkan skenario yang digunakan terkait permintaan dan skenario bauran energi terkait dengan penyediaan energi untuk mencapai target-target yang telah ditentukan. Selain itu, LEAP dengan pendekatan *accounting framework* juga dapat digunakan untuk melakukan eksplorasi sumber energi primer, dampak lingkungan, dan biaya sosial yang ditimbulkan dari beberapa skenario alternatif yang dirancang sesuai dengan analisa-analisa yang didapatkan melalui data-data sekunder maupun observasi lapangan secara langsung.

Beberapa kelebihan dari *accounting framework* menurut Gymnastiar (2012) adalah sebagai berikut:

- a. Sederhana, transparan dan fleksibel, dan memerlukan data dasar yang sangat sederhana,
- b. Simulasi tidak dilakukan dengan asumsi kompetisi yang ideal,
- c. Dapat digunakan untuk menganalisis pemilihan teknologi atau biaya dalam pengembangan sistem energi, dan
- d. Sangat berguna dalam aplikasi *capacity building*.

Disisi lain, terdapat beberapa kekurangan dari permodelan dengan pendekatan *accounting framework*, antara lain:

- a. Tidak secara otomatis dapat mengidentifikasi sistem *least-cost*, yaitu tidak sesuai untuk sistem yang sangat kompleks dimana perhitungan *least-cost* dibutuhkan.
- b. Tidak dapat menghasilkan perhitungan biaya yang konsisten, yaitu proyeksi permintaan energi dapat tidak konsisten dengan proyeksi konfigurasi penyediaan energi.

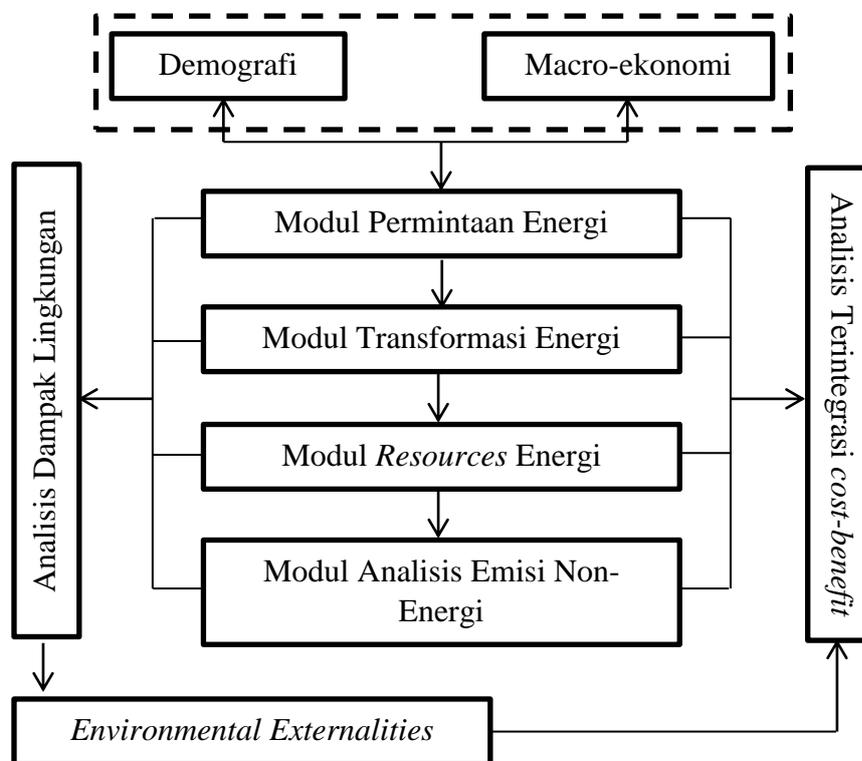
Dengan menggabungkan antara optimasi, simulasi, dan *accounting*, dalam perkembangannya, LEAP sudah dapat dianggap sebagai model *hybrid*. Agar dapat berfungsi sebagai model *hybrid*, LEAP beroperasi pada dua tahapan, yaitu relasi dasar *accounting* sebagai fasilitas *built-in* dan pengguna LEAP dapat menambahkan model simulasi dari hasil yang diperoleh LEAP. Untuk menentukan sistem *least-cost* dapat dilakukan dari hasil perhitungan optimasi. Akan tetapi, dalam aplikasi LEAP tidak dapat secara langsung digunakan untuk menentukan sistem *least-cost*, namun keluaran dari LEAP yang berupa teks bisa digunakan sebagai data masukan pada modul optimasi dari *Open Source energi Modeling Sistem* (OSeMOSYS). Setelah itu, untuk dapat ditampilkan sebagai hasil dari sistem *least-cost* hasil perhitungan optimasi OSeMOSYS perlu dimasukkan kembali ke dalam aplikasi LEAP..

Pada penggunaannya LEAP memberikan kemudahan untuk melakukan *import* dan *eksport* data serta melakukan pemindahan model yang dibuat di tempat lain, hal ini disebabkan *software* LEAP dirancang agar dapat bekerja secara langsung dan terhubung dengan produk-produk dari *Microsoft Office*, seperti *Microsoft Word*, *Microsoft Excel*, maupun *Microsoft Power Point*. Dengan seperti itu maka *user* dapat dengan mudah untuk mengoperasikan LEAP dan membuat simulasi-simulasi sesuai dengan kebutuhan dari *user*. Hasil-hasil dari analisa yang dilakukan oleh LEAP-pun dapat langsung dimanfaatkan oleh user untuk dijadikan model pelaporan atau presentasi yang mudah dibaca dan dipahami bersama.

2.5.2 Kapabilitas Pemodelan dengan LEAP

Menurut Lukman Juliantoro (2017), LEAP terdiri dari 5 buah modul utama, yaitu modul variabel penggerak, modul analisis permintaan energi, modul transformasi energi, modul analisis sumber daya, dan modul teknologi dan dampak lingkungan. Dalam modul variabel penggerak terdiri dari variabel demografi dan makro-ekonomi. Pada aplikasi LEAP modul variabel penggeraklah yang akan menentukan permintaan energi di dalam sistem energi yang dimodelkan. Lalu aktivitas atau intensitas penggunaan energi akan menentukan permintaan energi, besar permintaan energi didalam modul analisis permintaan energi yang dapat dibagi-bagi sesuai sektor pelanggan energi. Aktivitas ini direpresentasikan oleh variable yang didefinisikan di dalam variabel penggerak. Selanjutnya untuk mensimulasikan proses penyediaan energi maka perlu digunakan modul transformasi. Didalam modul transformasi energi ini terdiri dari proses yang menghubungkan antara sumber energi dengan pengguna energi dan proses konversi energi primer menjadi energi sekunder atau final. Simulasi terkait ketersediaan atau cadangan energi primer dilakukan pada modul analisis sumber daya. Selain itu, pada modul analisis sumber daya aktivitas atau proses ekspor dan impor sumber daya energi primer dari suatu wilayah menuju wilayah lainnya dapat disimulasikan. Fasilitas region yang terdapat pada aplikasi LEAP dapat digunakan untuk menganalisis ekspor dan impor sumber daya energi primer berdasarkan suatu wilayah tertentu yang akan disimulasikan.

Untuk modul analisis dampak lingkungan sendiri terdiri dari beberapa modul didalamnya, yaitu modul teknologi di dalam modul permintaan energi dan modul transformasi energi serta modul analisis dampak lingkungan dari sektor *non-energi*. Dampak lingkungan berkaitan dengan emisi yang dihasilkan dapat juga disimulasikan dari sisi permintaan energi, berdasarkan setiap jenis teknologi pengguna energi. Hal yang sama pun berlaku pada sisi penyediaan energi, proses-proses dalam transformasi energi dalam rangka pemenuhan kebutuhan energi final dapat disimulasikan emisi yang dihasilkannya. Kandungan atau konsentrasi emisi yang dihasilkan akan berberda-beda pada setiap proses penyediaan energi yang dilakukan. Seperti pada proses penyediaan energi listrik dalam Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) tentu akan menghasilkan emisi yang berbeda dengan penyediaan energi listrik dalam Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP). Untuk mendapatkan visualisasi prosesnya berikut diagram alir perhitungan yang dilakukan oleh LEAP ditunjukkan dalam gambar 2.4.



Gambar 2.4 Diagram alir perhitungan di dalam LEAP

Sumber: LEAP Indonesia *Guide*, Oetomo Tri Winarno 1997

Dengan memanfaatkan fasilitas modul *cost* yang tersedia di dalam LEAP, maka kita dapat melakukan analisis *cost-benefit*-nya. Analisis ini dapat dilakukan baik dari sisi permintaan energi maupun sisi penyediaan energi. Berdasarkan sisi permintaan energi, untuk setiap jenis teknologi pengguna energi untuk jenis-jenis biaya *capital*, operasi dan pemeliharaan, dan biaya *replacement* dapat dilakukan analisis tersendiri. Selanjutnya berdasarkan sisi penyediaan energi, analisis yang dapat dilakukan adalah analisis biaya yang terdiri dari biaya *capital*, biaya operasi dan pemeliharaan, biaya bahan bakar, dan biaya modul penyediaan energi yang tidak dipengaruhi oleh yang bersifat variabel. Selain itu, melalui modul *environment externality* berdasarkan sisi penyediaan energi, LEAP memberikan fasilitas perhitungan biaya yang dikeluarkan akibat dari emisi-emisi yang dihasilkan. Analisis *cost-benefit* yang terintegrasi dapat dilakukan melalui modul ini, karena setiap biaya yang dikeluarkan untuk setiap jenis emisi yang dihasilkan dapat disimulasikan oleh aplikasi LEAP. Sehingga data yang didapatkan pada hasil proyeksi lebih komprehensif, dan analisis *cost-benefit* yang dilakukan bisa lebih mendalam, terutama berkaitan dengan dampak lingkungan secara global.

Secara garis besar, kapabilitas pemodelan sistem energi dengan menggunakan LEAP adalah:

- a. Permintaan Energi:
 - Pemodelan permintaan energi secara terstruktur berdasarkan sektor pelanggan,
 - Pemodelan permintaan energi berdasarkan perubahan penggunaan jenis energi.
- b. Konversi Energi:
 - Simulasi jeni-jenis konversi energi (pembangkit listrik, transmisi dan distribusi energi listrik, kilang minyak, proses pembuatan arang kayu, penambangan batubara, ekstrasi minyak bumi, produksi ethanol, dan lain sebagainya),
 - Sistem *dispatch* pembangkit listrik berdasarkan LDC,
 - Pemodelan ekspansi kapasitas dengan metode *exogenous* dan *endogeneous*.

- c. Sumber Daya Energi:
 - Kebutuhan, produksi, dan ekspor dan impor energi primer,
 - Perhitungan berdasarkan luar-wilayah untuk sumber energi biomasa dan energi terbarukan.
- d. Biaya:
 - Semua biaya yang diperlukan di dalam sistem energi yang terdiri dari biaya *capital*, operasi dan pemeliharaan, bahan bakar, efisiensi energi, dan dampak lingkungan.
- e. Dampak Lingkungan:
 - Semua emisi dan dampak langsung dari sistem energi,
 - Sumber-sumber sektor *non*-energi.

2.5.3 Metode-Metode Dalam LEAP

Dengan menggunakan skenario-skenario yang didefinisikan oleh pengguna, aplikasi LEAP merupakan perangkat lunak yang dapat digunakan untuk mensimulasikan sistem energi. Skenario ini merupakan alur yang konsisten dengan tujuan untuk menggambarkan bagaimana suatu sistem energi berkembang dalam kurun waktu tertentu. Setiap skenario yang disusun akan mengacu pada kondisi awal yang dideskripsikan pada tahun dasar sebagai *current account*. Didalam aplikasi LEAP pengguna dapat mensimulasikan beberapa skenario yang dirancang baik secara terpisah maupun terintegrasi satu dengan lainnya, seperti misalnya suatu skenario yang disusun dapat mengacu pada skenario lainnya.

Pada aplikasi LEAP, permintaan energi dimodelkan dengan struktur hirarki yang fleksibel. Dimana permintaan energi dapat dikategorikan berdasarkan sektor pengguna atau pelanggan energi, sub-sektor pengguna atau pelanggan energi, maupun jenis teknologinya. Analisis permintaan energi di dalam LEAP bertujuan untuk menentukan permintaan energi dan biaya-biaya yang berhubungan langsung dengan konsumsi energi di dalam suatu model sistem energi.. Analisis permintaan energi dapat dilakukan dengan beberapa metode, yaitu analisis *end-use energi*, *econometric forecast*, dan *model stock- turnover*.

Selanjutnya simulasi yang dilakukan oleh aplikasi LEAP pada sisi penyediaan energi listrik, didasarkan pada 2 hal, yaitu ekspansi kapasitas pembangkit listrik dan *dispatch rule* pembangkit listrik. Tujuan dari ekspansi kapasitas pembangkit listrik adalah untuk menentukan besaran, jenis pembangkit, serta waktu penambahan kapasitas pembangkit guna memenuhi permintaan energi listrik. Sedangkan *dispatch rule* bertujuan untuk menentukan bagaimana pembangkit listrik beroperasi setelah dibangun. Untuk menentukan ekspansi kapasitas pembangkit listrik di dalam LEAP dapat dilakukan dengan 2 cara, yaitu secara *exogenous* dan secara *endogenous*. Pada ekspansi kapasitas pembangkit listrik secara *exogenous* untuk menentukan besaran, jenis pembangkit serta waktu penambahan kapasitas dilakukan secara manual dengan memasukkan nilai kapasitas dan waktu penambahan kapasitas maupun jadwal *retirement* pembangkit listrik. Berbeda dengan ekspansi kapasitas pembangkit secara *exogenous* pada ekspansi kapasitas pembangkit listrik secara *endogenous* semuanya dilakukan secara otomatis oleh LEAP. Hanya pada jenis pembangkit listrik yang akan di ekspansi kapasitasnya lah pengguna dapat melakukan intervensi, sedangkan sisanya LEAP akan menentukan besar kapasitas dan waktu penambahan kapasitas tersebut. Proses dalam menentukan kapasitas besaran dan waktu penambahan pada ekspansi kapasitas secara *endogenous*, bertujuan untuk mempertahankan *reserve margin* yang telah ditentukan melalui skenario dan secara otomatis aplikasi LEAP akan menambahkan besaran kapasitas yang dibutuhkan.

Berikutnya pada metode *dispatch rule* terdapat dua metode *dispatch* sistem pembangkit listrik di dalam LEAP, yaitu berdasarkan pembangkitan energi listrik secara historis dan berdasarkan *dispatch rule* sistem pembangkit listrik. Kedua metode tersebut yaitu dengan menggunakan persentase dari pembangkitan energi listrik sampai metode *merit order* dan *running cost*. Selain itu pada setiap jenis sistem pembangkit dapat disimulasikan dengan metode *dispatch* yang berbeda-beda. Sebagai contoh, jenis pembangkit listrik dengan energi primer dari energi terbarukan menggunakan *dispatch* berdasarkan presentase pembangkitan energi listrik sedangkan jenis pembangkit listrik lainnya menggunakan metode *dispatch* berdasarkan *merit order*.

Pada aplikasi LEAP untuk menghitung biaya sistem pembangkit listrik, dilakukan perhitungan *cost-benefit* dari sudut pandang *social-cost* dengan menggunakan metode perhitungan mengakumulasi semua biaya yang berhubungan dengan sistem energi yang dimodelkan dan kemudian membandingkan hasil perhitungan biaya dari beberapa skenario yang dirancang. Untuk dapat melakukan perhitungannya, aplikasi LEAP membutuhkan elemen-elemen biaya yang terdiri dari:

- a. Biaya dari sisi permintaan energi yang dapat dinyatakan dalam biaya total, biaya per-aktivitas, atau biaya efisiensi energi *relative* terhadap suatu skenario,
- b. Biaya *capital* transformasi energi,
- c. Biaya tetap dan variabel operasi dan pemeliharaan,
- d. Biaya sumber daya energi primer (biaya bahan bakar),
- e. Biaya sumber daya energi primer yang diimpor
- f. Keuntungan biaya dari aktivitas ekspor sumber daya energi primer,
- g. Biaya *externality* polusi dari sektor transformasi energi, dan
- h. Biaya-biaya lainnya yang dapat didefinisikan seperti biaya program efisiensi energi.

Gymnastiar (2017), perhitungan biaya *capital* di dalam LEAP merupakan biaya *capital* selama periode *lifetime* dari suatu pembangkit listrik, yang mana periode ini bisa dimasukkan pada ekspansi pembangkit listrik sesuai dengan skenario-skenario yang akan digunakan baik melalui cara *exogenous* maupun *endogenous*. Metode yang digunakan dalam perhitungan biaya ini menggunakan *standart mortgage* seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.1, 2.2 dan 2.3. Dalam persamaan 2.2 dan 2.3, i merupakan interest rate, n *lifetime* sistem pembangkit listrik, dan CRF adalah *capital recovery factor*.

$$\text{Annualized cost} = \text{Total Cost} \times \text{CRF} \quad (2.1)$$

$$\text{CRF} = \frac{i-k}{k-1} \quad (2.2)$$

$$k = (1 + i)^n \quad (2.3)$$

2.5.4 Perhitungan Permintaan Energi

Untuk melakukan perhitungan permintaan energi didalam aplikasi LEAP, dilakukan menggunakan dua metode, yaitu metode energi final dan energi *useful*. Di dalam analisi permintaan energi final, permintaan energi dihitung sebagai perkalian antara level aktivitas dan intensitas energi. Level aktivitas merupakan ukuran aktivitas sosial dan ekonomi yang mempengaruhi permintaan energi. Sedangkan intensitas energi adalah rata-rata konsumsi energi per teknologi pengguna energi atau per satuan level aktivitas. Selanjutnya, merujuk pada Gymnastiar (2017) permintaan energi dihitung untuk tahun dasar dan periode simulasi LEAP dengan menggunakan persamaan 2.4:

$$D_{b,s,t} = TA_{b,s,t} \times EL_{b,s,t} \quad (2.4)$$

Dimana:

TA : Level aktivitas,

EL : Intensitas energi,

b : Cabang yang didefinisikan di dalam LEAP,

s : Skenario,

t : Tahun dari 0 (tahun dasar) sampai dengan akhir tahun simulasi

2.5.5 Perhitungan Kapasitas Pembangkit Listrik

Kapasitas pembangkit listrik dapat dihitung secara *endogenous* untuk mempertahankan nilai *planning reserve margin* (PRM) yang telah ditentukan. Merujuk pada Gymnastiar (2017), perhitungan kapasitas pembangkit diawali dengan menghitung nilai kapasitas yang ada dengan persamaan 2.5.

$$C_{BA} = (C_{EX} + C_{EN}) \times C_{value} \quad (2.5)$$

Di mana :

C_{BA} : kapasitas awal (MW)

C_{EX} : kapasitas *exogenous* (MW)

C_{EN} : kapasitas *endogenous* yang telah ditambahkan (MW)

C_{value} : presentase nilai kapasitas *actual* (MW)

Untuk dapat memenuhi kebutuhan beban puncak, maka perlu perhitungan mengenai kapasitas yang dibutuhkan. Perhitungan kapasitas yang dibutuhkan menurut Gymnastiar (2017) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.6.

$$C_{peak} = \frac{D}{LF \times 8760 \text{ (jam/tahun)}} \quad (2.6)$$

Di mana :

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

D : permintaan energi listrik (MWh),

LF : faktor beban sistem.

Planning Reserve Margin (PRM) awal sebelum adanya penambahan kapasitas secara *endogenous*. Untuk menghitung PRM awal menurut Gymnastiar (2017) didapat berdasarkan persamaan 2.7.

$$PRM_{BA} = (C_{BA} - C_{peak}) / C_{peak} \quad (2.7)$$

Pada persamaan 2.7, PRM_{BA} merupakan *Planning Reserve Margin* (PRM) sebelum adanya penambahan kapasitas secara *endogenous*. Selanjutnya, kapasitas pembangkit listrik yang diperlukan secara *endogenous* ditentukan melalui persamaan 2.8.

$$C_{ENA} = (PRM - PRM_{BA}) \times C_{peak} \quad (2.8)$$

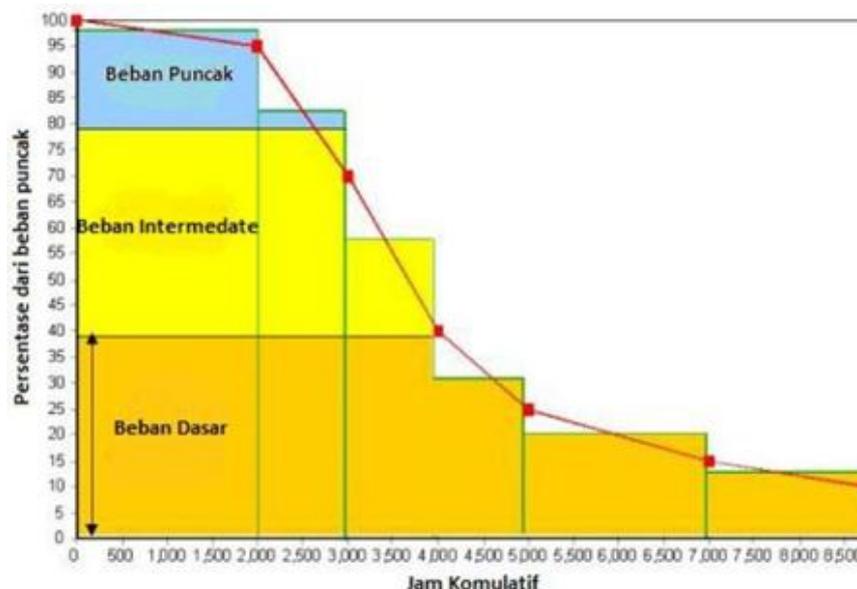
Berdasarkan persamaan 2.8, C_{ENA} adalah kapasitas pembangkit listrik yang harus ditambahkan untuk mempertahankan *Planning Reserve Margin* (PRM) pada nilai yang sudah ditentukan sebelumnya. Dengan demikian sejalan dengan penjelasan sebelumnya terkait ekspansi kapasitas melalui cara *endogenous* bahwa secara otomatis aplikasi LEAP akan menghitung kapasitas pembangkit listrik yang dibutuhkan untuk setiap proses pembangkit listrik guna memenuhi permintaan dan kebutuhan energi.

2.5.6 Proses Dispatch Pembangkit Listrik

Pada metode *dispatch* untuk perhitungan optimasi pembangkit listrik didasarkan pada *runningcost*. Selain itu *load duration curve* (LDC) harus diikutsertakan pada modul pembangkit listrik dengan menggunakan metode *dispatch*. Selanjutnya, LEAP akan mensimulasikan *dispatch* setiap jenis proses pembangkit listrik baik untuk memenuhi kebutuhan energi listrik yang ditentukan oleh LDC maupun kebutuhan energi listrik secara keseluruhan. Menurut Wahyu (2017) *running cost* ditentukan dengan persamaan 2.9.

$$RunningCost_i = VariableOMCost_i + \frac{FuelCost_i}{Eficiency_i} \quad (2.9)$$

Mengurutkan proses pembangkit listrik berdasarkan *merit order* yang telah ditentukan merupakan tahapan pertama dalam aplikasi LEAP untuk mensimulasikan proses *dispatch* pembangkit listrik. Informasi dari proses pengurutan ini digunakan untuk menentukan kapasitas yang tersedia untuk setiap kelompok *merit order*. Selanjutnya, LEAP akan melakukan pendekatan diskrit terhadap LDC yang telah ditentukan dan dibagi kedalam interval *time slice* seperti pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Komulatif LDC

Sumber : LEAP Indonesia *Guide*, Oetomo Tri Winarno 1997

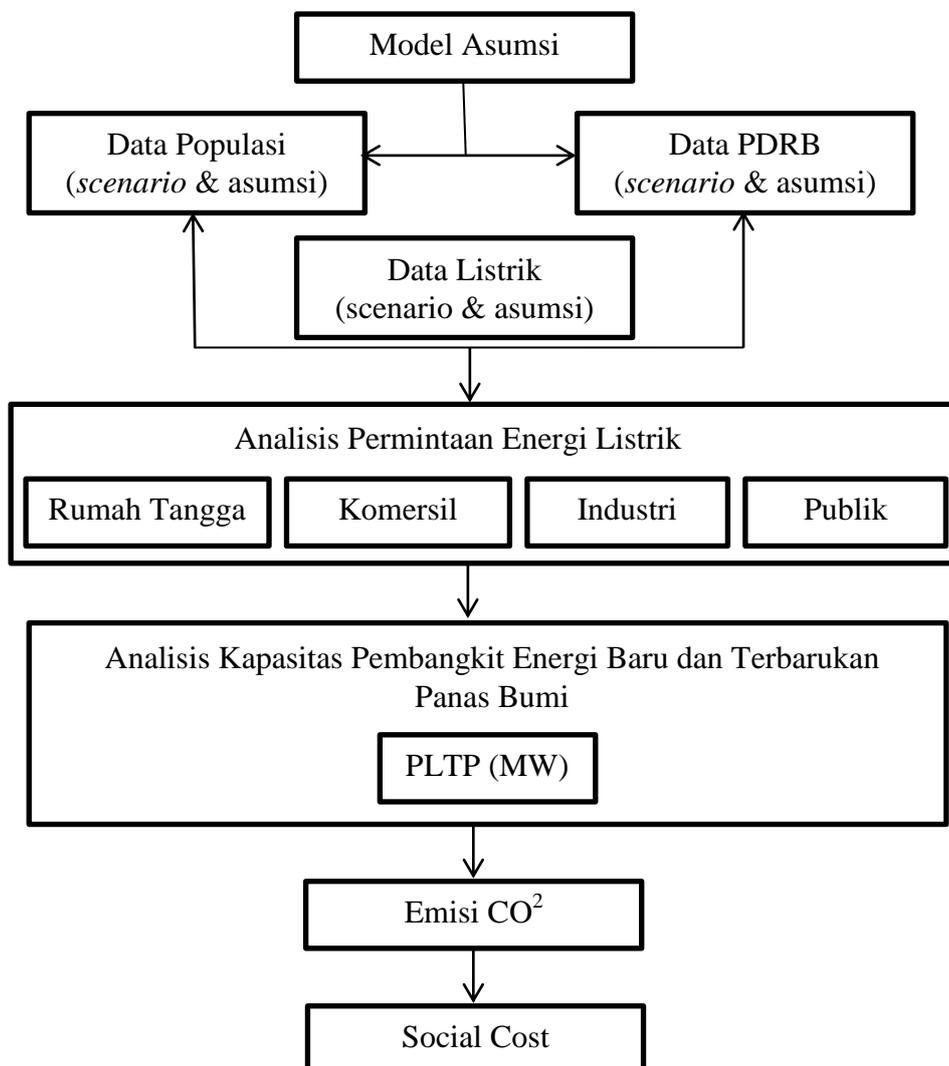
Berdasarkan informasi yang di dapatkan dalam gambar 2.5, tinggi setiap interval beban puncak sistem yang diperlukan dikalikan dengan rata-rata persentase beban puncak dari dua titik yang berdekatan pada kurva LDC yang telah ditentukan. Sedangkan lebar setiap interval adalah perbedaan jumlah jam untuk dua buah titik yang berdekatan. Untuk memenuhi kebutuhan beban puncak sistem secara keseluruhan ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.6.

Kebutuhan energi listrik di bawah kurva LDC dipenuhi dengan cara *dispatch* setiap proses pembangkit listrik berdasarkan interval vertikal. *Dispatch* pertama kali proses pembangkit listrik adalah untuk memenuhi beban dasar, diikuti dengan pembangkit berikutnya yang digunakan untuk memenuhi beban *intermediate* dan beban puncak. Guna merepresentasikan ketersediaan teknis rata-rata setiap pembangkit listrik, ketinggian maksimum setiap interval adalah kapasitas yang tersedia untuk setiap kelompok proses pembangkit listrik. Daerah di bawah kurva LDC harus terisi penuh dengan cara *dispatch* setiap kelompok pembangkit. Pada saat kapasitas yang tersedia melampaui jumlah yang diperlukan, kapasitas aktual untuk setiap proses yang *dispatch* dikurangi sedemikian hingga setiap proses *dispatch* secara proporsional terhadap kapasitas yang tersedia.

2.5.7 Diagram Alir Pemodelan LEAP

Dalam penyusunan tugas akhir ini digunakan model *Long-range Energi Alternatives Planning* sistem (LEAP) dengan diagram alir sebagaimana pada gambar 2.6. Pemodelan pada LEAP adalah dengan skenario terpadu berbasis lingkungan dan energi. Analisis terhadap konsumsi energi, transformasi dan produksi di LEAP digabungkan dalam suatu sistem energi dengan menggunakan indikator demografi, pembangunan ekonomi, teknologi, harga, kebijakan dan regulasi. Merujuk masukan data-data yang didapatkan pada model asumsi, LEAP akan memprosesnya menjadi analisa permintaan energi yang dibagi lagi menjadi beberapa sektor permintaan energi tersebut, seperti permintaan energi pada sektor rumah tangga, sektor komersil, sektor industri, dan sektor publik sesuai dengan skenario yang diinginkan oleh pengguna. Dalam proses simulasi juga kita dapat

menentukan model bauran energi yang kita rencanakan, dengan menggunakan skenario-skenario bauran yang diinginkan. Skenario tersebut digunakan dengan cara memasukan jenis-jenis dari sumber energi yang ada baik berupa sumber energi fosil maupun sumber energi baru dan terbarukan sehingga nantinya akan menentukan model atau jenis pembangkit listrik untuk dapat memenuhi kebutuhan energi. Untuk memberikan visualisasi mengenai proses kerja dalam aplikasi LEAP, berikut diagram alir pemodelan di LEAP ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Diagram alir pemodelan LEAP

Sumber : LEAP Indonesia *Guide*, Oetomo Tri Winarno 1997

2.5.8 Simulasi LEAP

Guna menjalankan simulasi pada aplikasi LEAP, perlu untuk melihat kembali data yang dimiliki. Kelenturan dan kemudahan pengguna dalam menjalankan simulasi ini sangat dimungkinkan karena algoritma LEAP yang memiliki fleksibilitas tinggi. Pengguna dapat mensimulasikan dalam LEAP sesuai data yang dimiliki. Maka ketika data yang dimiliki sangat lengkap seperti emisi buang pada setiap sektor maupun transformasi energi, teknologi pembangkitan, hingga peralatan elektronik dan penerangan dalam bangunan mampu diakomodir oleh LEAP. Selain itu, meskipun dalam menggunakan LEAP untuk mensimulasikan sebuah sistem energi data yang dimiliki sangat terbatas seperti simulasi atau proyeksi pada penelitian ini dimana hanya dimiliki data yang berkaitan dengan konsumsi energi listrik pun LEAP tetap dapat memprosesnya.

Untuk memulai simulasi, langkah pertama yang harus dijalankan adalah mengatur dan menentukan parameter dasar simulasi sesuai dengan skenario dan data yang dimiliki. Analisis permintaan (*demand*) merupakan cakupan kerja yang ditentukan dalam parameter dasar, dan hal penting lainnya dalam menentukan parameter dasar adalah tahun dasar simulasi. Dalam penelitian ini yang digunakan sebagai tahun dasar adalah tahun 2019, dan menentukan batas akhir periode simulasi yaitu tahun 2029. Lalu yang terakhir adalah menentukan unit satuan yang digunakan seperti unit energi, satuan panjang, mata uang dan satuan massa.

Aplikasi LEAP menyediakan empat modul utama dan tiga modul tambahan dalam proses analisis datanya. Modul utama merupakan modul-modul standar yang umum digunakan dalam pemodelan energi, yang terdiri dari:

a. Modul *Key Assumption*

Untuk menampung parameter-parameter umum yang dapat digunakan pada modul *demand* maupun modul *transformation* dibutuhkan *modul key assumption* sebagai wadahnya. Beberapa contoh dari parameter umum ini misalnya adalah jumlah penduduk, PDRB (Produk Domestik Regional Bruto) dan sebagainya. Modul *key assumption* ini bersifat komplemen terhadap modul lainnya.

b. Modul *Demand*

Modul *demand* adalah modul yang digunakan untuk menghitung permintaan energi - energi. Di dalam modul *demand* pembagian sektor pemakai atau pelanggan energi sepenuhnya dapat dilakukan sesuai kebutuhan pemodel, seperti pada penelitian ini dibagi kedalam lima sektor pelanggan energi listrik. Permintaan energi didefinisikan sebagai perkalian antara aktifitas pemakaian energi (misalnya jumlah penduduk, jumlah kendaraan, volume nilai tambah, dan sebagainya) dan intensitas pemakaian energi yang bersangkutan.

c. Modul *Transformation*

Pada modul *transformation* dapat dihitung pemasokan energi pada skenario yang dibuat, pemasokan energi dapat terdiri atas produksi energi primer (gas bumi, minyak bumi, batu bara dan sebagainya) dan energi sekunder (listrik, bahan bakar minyak, LPG, briket, batubara, arang dan sebagainya). Dalam modul *Transformation* susunan cabang sudah ditentukan strukturnya, dimana kegiatan transformasi energi terdiri dari proses dan output. Oleh karenanya pada modul ini dapat dilihat proses *transformasi* energi yang mana dalam hal ini adalah proses pembangkitan listrik, melalui cabang-cabang teknologi yang tersedia. Pada cabang teknologi tersebutlah dapat dimasukkan data-data transformasi energi yang dibutuhkan pengguna aplikasi LEAP.

d. Modul *Resources*

Secara *default* modul *resources* terdiri atas sumber primer dan sekunder. Dengan sendirinya cabang-cabang tersebut keluar sesuai dengan jenis energi yang dimodelkan pada modul *transformation*. Akan tetapi meskipun terdapat cabang data yang keluar secara otomatis namun masih ada beberapa parameter yang perlu diisikan secara manual, seperti jumlah cadangan energi semisal batubara, minyak bumi, gas bumi maupun lainnya, dan juga potensi energi baru terbarukan seperti tenaga air, panas bumi, tenaga angin, biomasa, dan lain sebagainya.

Selanjutnya adalah modul tambahan yang merupakan modul pelengkap terhadap modul utama jika diperlukan. Modul tambahan terdiri dari beberapa modul yang disediakan secara otomatis, yaitu:

a. Modul *Statistical Differences*

Didalam modul *statistical differences* adalah lokasi untuk menuliskan asumsi-asumsi selisih data antara data *demand* dan *supply* karena perbedaan dalam pendekatan perhitungan *demand* dan perhitungan *supply* energi. Berdasarkan pada jenis energi yang dimodelkan pada modul *demand*, secara otomatis pada modul *statistical differences* cabang-cabang akan muncul dengan sendirinya. Umumnya *statistical differences* pada pemodelan bernilai nol.

b. Modul *Stock Changes*

Untuk menuliskan asumsi cadangan energi atau perubahan stok diawal tahun simulasi dan tahun-tahun selanjutnya dalam rentan waktu proyeksi digunakan-lah modul *stock changes*. Sama seperti pada modul *statistical differences*, cabang-cabang pada modul *stock changes* akan muncul dengan sendirinya, hanya saja didasarkan pada energi yang digunakan pada modul *transformation*.

c. Modul *Non-Energy Sector Effect*

Pada modul *non-energy sector effect* pengguna dapat menempatkan variabel-variabel dampak negatif pada akibat dari kegiatan sektor energi, seperti tingkat kecelakaan, terganggunya ekosistem disekitar lokasi, hingga penurunan kesehatan, dan lain sebagainya. Struktur dari modul *non-energy sector effect* untuk simulasi pada aplikasi LEAP sudah baku. berdasarkan susunan dari atas ke bawah. Didalam mensimulasikan sistem energi, aplikasi LEAP bersifat *straight forward* atau tidak ada *feedback* antara *Supply* Energi dengan *Demand* Permintaan energi selalu dianggap terpenuhi oleh pasokan energi baik yang berasal dari transformasi energi domestik maupun impor energi untuk pemenuhannya.