

# Analisis Skenario Permintaan dan Penyediaan Energi Listrik pada Sistem Interkoneksi Jawa-Madura-Bali 2050

Rahmat Adiprasetya Al Hasibi<sup>1</sup>, Sasongko Pramono Hadi<sup>2</sup>, Avrin Nur Widiastuti<sup>3</sup>

**Abstract**—Scenario analysis of electricity supply to meet the demand of electricity is done by the support of LEAP software. Developed LEAP model used the base year of 2010 and the end year of 2050. In the model, scenario consisted of demand and supply side scenarios. In the demand side, designed scenario consisted of the reference and the conservation scenario. The reference scenario used to describe the demand of electricity without any introduction of conservation strategy. While in the conservation scenario, the strategy of energy conservation was integrated in the model. In the supply side, designed scenario consisted of the reference, the optimized, and the reduction of CO<sub>2</sub> emission scenario. The reduction of CO<sub>2</sub> emission scenario consisted of the implementation of nuclear power plant and renewable energy power plant. The result of the simulation showed that by the implementation of energy conservation strategy the demand of electricity in JAMALI system can be reduced by 20% compare to the reference scenario. The implementation of nuclear power plant can be used to reduce the CO<sub>2</sub> emission with the growth of 3.26% per year. In the other hand, the implementation of renewable energy will reduce the CO<sub>2</sub> emission with the growth of 3.14% per year.

**Intisari**—Analisis skenario penyediaan energi listrik untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak LEAP. Model LEAP dikembangkan dengan menggunakan tahun dasar 2010 dan tahun akhir proyeksi 2050. Skenario di dalam model LEAP disusun dari sisi permintaan dan penyediaan energi listrik. Dari sisi permintaan, skenario yang disusun terdiri dari skenario referensi dan skenario konservasi. Skenario referensi bertujuan untuk mengimplementasikan strategi konservasi energi di dalam perencanaan ketenagalistrikan. Dari sisi penyediaan, skenario yang disusun terdiri dari skenario referensi, skenario optimasi, dan skenario penurunan emisi CO<sub>2</sub>. Skenario penurunan emisi CO<sub>2</sub> terdiri dari skenario implementasi PLTN dan skenario energi baru dan terbarukan. Hasil simulasi menunjukkan skenario konservasi energi listrik dapat menurunkan permintaan energi listrik hingga 20% dibandingkan dengan skenario referensi. Implementasi PLTN dapat menurunkan emisi CO<sub>2</sub> di sektor pembangkitan energi listrik dengan pertumbuhan rata-rata 3,26% per tahun. Implementasi energi baru dan terbarukan sebagai skenario alternatif penurunan emisi CO<sub>2</sub> juga dapat menurunkan pertumbuhan emisi CO<sub>2</sub> dengan rata-rata pertumbuhan 3,14% per tahun.

**Kata Kunci**— analisis skenario, konservasi energi, optimasi, perangkat lunak LEAP, PLTN, energi baru dan terbarukan.

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jln. Lingkar Selatan, Tamantirto, Bantul 55183 INDONESIA (e-mail: rahmat.alhasibi@gmail.com)

<sup>2,3</sup> Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi FT UGM, Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA (e-mail: sasongko@te.ugm.ac.id, avrin@ugm.ac.id)

## I. PENDAHULUAN

Permintaan terhadap energi listrik semakin meningkat seiring dengan peningkatan aktivitas ekonomi dan pertambahan jumlah penduduk. Energi listrik yang dibangkitkan di dunia pada tahun 2008 mencapai 20.181 TWh. Energi primer yang digunakan untuk membangkitkan energi listrik ini masih didominasi oleh batubara sebesar 41.0%. Penggunaan energi terbarukan seperti panas bumi, energi matahari, tenaga angin, dan sampah organik hanya sebesar 2.8%. [1]. Di Indonesia, kebutuhan energi tahun 2008 mencapai 179,48 MTOE. Sedangkan jumlah energi listrik yang dibangkitkan di Indonesia tahun 2008 mencapai 149,44 TWh. Dari seluruh penggunaan energi listrik tersebut, sebagian besar energi listrik digunakan oleh pelanggan yang terhubung di dalam sistem interkoneksi Jawa-Madura-Bali (JAMALI), yaitu sebesar 78,11% [2]. Energi primer yang digunakan di dalam sistem interkoneksi JAMALI juga masih didominasi oleh penggunaan batubara, minyak bumi, dan gas alam yaitu sebesar 40,90%, 29,13%, dan 20,14% dari keseluruhan produksi energi listrik di dalam sistem interkoneksi JAMALI.

Selain cadangan minyak bumi, gas alam, dan batubara, Indonesia juga memiliki potensi energi terbarukan yang sangat potensial untuk dikembangkan dalam penyediaan energi listrik. Potensi panas bumi ini banyak dijumpai di Sumatera (13.800 MW), Jawa dan Bali (10.359,5 MW), dan Sulawesi (2.000 MW). Dari keseluruhan potensi ini, pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) yang telah dikembangkan hanya sebesar 964 MW dan terletak di Jawa dan Bali. Tenaga air merupakan potensi energi terbarukan yang paling besar tetapi belum dapat dikembangkan secara efektif dalam penyediaan energi listrik. Potensi tenaga air di Indonesia diperkirakan mencapai 75.674 MW dan hanya 4.200 MW (sekitar 5%) yang telah digunakan dalam penyediaan energi listrik [3].

Dalam pemenuhan energi listrik, perencanaan energi listrik harus dilakukan dengan memperhatikan faktor dampak terhadap lingkungan dengan memanfaatkan semua potensi energi yang ada. Perencanaan energi listrik untuk sistem JAMALI telah dilakukan oleh PLN dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL), Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN), dan Rencana Umum Ketenagalistrikan Daerah (RUKD). Di dalam laporan-laporan perencanaan penyediaan energi listrik tersebut, pembahasan dititikberatkan penentuan kapasitas pembangkit untuk memenuhi kebutuhan energi listrik serta emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan sebagai dampak lingkungan. Di lain pihak, target-target konservasi energi dan penurunan emisi CO<sub>2</sub> juga telah terdapat di dalam dokumen Rencana Induk Konservasi Energi

Nasional (RIKEN) dan Rencana Aksi Nasional Gas Rumah Kaca (RAN-GRK). Namun demikian, strategi-strategi konservasi energi dan penurunan emisi CO<sub>2</sub> belum diikutsertakan pada laporan-laporan tentang perencanaan energi listrik yang telah dipublikasikan.

Tujuan dari studi yang dilakukan adalah bagaimana menentukan skenario penyediaan energi listrik yang paling optimal dari sudut pandang biaya dan dampak terhadap lingkungan pada sistem interkoneksi JAMALI. Analisis yang dilakukan meliputi proyeksi permintaan energi listrik, penyediaan energi listrik dengan sistem *least-cost*, dan strategi penurunan emisi CO<sub>2</sub>. Analisis dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Long-range Energy Alternatives Planning* (LEAP).

## II. STUDI PUSTAKA

### A. Penggunaan LEAP dalam Perencanaan Energi

Di tahun 1997, LEAP digunakan untuk menganalisis penggunaan energi nuklir dan limbah nuklir yang dihasilkan dalam sistem pembangkitan energi listrik di Asia Timur Laut [4]. Tujuan analisis yang dilakukan adalah estimasi energi listrik yang dibangkitkan setiap tahun sesuai dengan jenis pembangkit listrik dan selanjutnya digunakan untuk mengestimasi limbah nuklir yang dihasilkan oleh setiap sistem pembangkit. LEAP digunakan untuk menganalisis implementasi kebijakan efisiensi energi berdasarkan potensi efisiensi energi yang telah ditentukan sebelumnya. Skala analisis dapat hanya dalam lingkup sektor komersial maupun industri kecil [5]. Dalam paper ini, penggunaan energi terbarukan adalah dari 0,5% menjadi 8% di tahun 2011. Sedangkan target energi efisiensi direpresentasikan dengan perubahan elastisitas energi di tahun 2011 menjadi 1:1. *Feasibility study* penggunaan LEAP sebagai perangkat lunak pendukung perencanaan energi di Pakistan dilakukan oleh Sahir (2007). Perencanaan energi disini bertujuan untuk menganalisis skenario penyediaan energi di masa mendatang dalam konteks keamanan pasokan energi dan permasalahan penyediaan energi yang berkelanjutan [6].

### B. LEAP dalam Perencanaan Energi Listrik

Analisis pemanfaatan potensi energi panas bumi untuk penyediaan energi dilakukan dengan kasus di sistem JAMALI. LEAP digunakan untuk menganalisis pemanfaatan energi panas bumi dalam ekspansi penyediaan energi listrik di sistem JAMALI [7]. Di dalam paper ini, pemanfaatan energi panas bumi dilakukan dalam tiga skenario dengan kapasitas pembangkit yang berbeda-beda. Penambahan kapasitas pembangkit dilakukan secara *endogenous*. Paper ini belum menggunakan perhitungan optimasi dalam penentuan besar pembangkit listrik yang dibutuhkan. Di sektor pembangkitan energi listrik, analisis pemilihan bahan bakar dapat dilakukan dengan menggunakan LEAP. Wangjiraniran dan Euaarporn (2010) melakukan studi pemilihan bahan bakar untuk pembangkitan energi listrik di Thailand [8]. Studi yang dilakukan difokuskan pada penggunaan gas alam, batubara, dan energi nuklir pada penyediaan energi listrik jangka panjang. Penggunaan energi terbarukan dengan porsi yang

besar dalam penyediaan energi listrik disimulasikan di Pulau Crete, Yunani [9]. Sistem kelistrikan di Pulau Crete merupakan sistem terisolasi yang terbesar di Yunani. Model LEAP dikembangkan menggunakan dua buah skenario dengan tujuan untuk mengestimasi biaya dan keuntungan yang berhubungan dengan penggunaan energi terbarukan dalam pembangkitan energi listrik skala besar. Analisis potensi dan operasi optimal pembangkitan tersebar di Estonia dilakukan oleh Kuhi-Thalfeldt dan Valtin (2011) [10]. Sistem kelistrikan di Estonia sangat bergantung pada penggunaan minyak bumi sebagai energi primer. Dengan semakin menurunnya kinerja pembangkit listrik yang telah ada dan semakin meningkatnya permintaan energi listrik, pemanfaatan pembangkitan tersebar dapat digunakan untuk melakukan efisiensi dalam penggunaan minyak bumi.

### C. Perencanaan Strategi Mitigasi CO<sub>2</sub> dengan LEAP

Analisis potensi konservasi energi dalam usaha untuk mendukung penurunan emisi CO<sub>2</sub> di Thailand dilakukan dengan menggunakan LEAP [11]. Analisis yang dilakukan dalam paper ini dilakukan untuk sektor transportasi, industri, dan rumah tangga. Untuk sektor industri dan rumah tangga, peningkatan efisiensi peralatan listrik dan teknologi pengguna energi lainnya sebagai parameter dalam penentuan potensi konservasi energi. Cai (2008) melakukan analisis perbandingan skenario mitigasi CO<sub>2</sub> untuk lima sektor di Cina [12]. Tujuan analisis yang dilakukan adalah untuk memberikan informasi yang lebih baik sebagai rekomendasi untuk kebijakan perubahan iklim melalui studi potensi penurunan emisi CO<sub>2</sub> dan kemungkinan-kemungkinan kegiatan mitigasi CO<sub>2</sub>. Analisis ekonomi dan lingkungan di sistem JAMALI telah dilakukan dengan menggunakan LEAP. Tujuan dari studi ini adalah membandingkan penggunaan teknologi sistem pembangkit dengan bahan bakar batubara dan panas bumi. Perbandingan meliputi kapasitas pembangkit, emisi CO<sub>2</sub>, dan biaya yang dibutuhkan antara skenario batubara dan skenario panas bumi [13]. Pemodelan energi dan emisi karbon sebagai pengambilan keputusan dengan menggunakan metode multi-kriteria sebagai dasar pengembangan sektor industri yang berkelanjutan dikembangkan oleh Phdungsilp dan Wuttipornpun (2011) dengan studi kasus di Thailand. Dalam studi ini, beberapa alternatif kebijakan di sektor industri dimodelkan dengan menggunakan LEAP yang menggambarkan perkembangan energi di sektor industri dalam periode 2005-2030 [14].

## III. METODE PENELITIAN

LEAP merupakan sebuah model perencanaan energi yang terdiri dari model struktur sampai pada pengguna energi terakhir. Berdasarkan prosedur analisis dari sistem permintaan dan penyediaan energi, model LEAP dapat digunakan untuk menjabarkan penggunaan energi berdasarkan jenis konsumen atau teknologi yang digunakan oleh konsumen [15]. Energi keseluruhan dihitung untuk setiap kategori atau subkategori. Di dalam model LEAP, perhitungan permintaan energi dihitung dengan (1).

$$\sum E_t = T_t \times I_t \quad (1)$$

Di dalam (1),  $E_t$  adalah permintaan energi keseluruhan,  $T_t$  adalah data level aktivitas, dan  $I_t$  adalah intensitas energi.

Dalam penelitian ini, tahun dasar yang digunakan adalah tahun 2010 dengan tahun akhir proyeksi adalah tahun 2050. Semua data dan informasi di tahun dasar dikumpulkan dari instansi-instansi yang terkait. Dan tahun dasar ini selanjutnya digunakan untuk menentukan skenario yang paling optimal dalam penyediaan energi listrik pada sistem JAMALI dari sisi biaya dan dampak lingkungan yang ditimbulkan.

**A. Data Variabel Penggerak**

LEAP menggunakan data demografi dan aktivitas ekonomi sebagai variabel penggerak kebutuhan energi listrik. Data tentang variabel penggerak diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS). Menurut BPS, jumlah penduduk yang ada di provinsi-provinsi Jawa dan Bali diperlihatkan pada Tabel 1 [16]. Data tahun 2010 merupakan data hasil sensus penduduk yang telah dilaksanakan di tahun tersebut. Di tahun 2005, pertumbuhan penduduk secara keseluruhan di ketujuh provinsi ini adalah sebesar 1,22% dan menurun menjadi 1,15% di tahun 2010. Proyeksi pertumbuhan penduduk yang digunakan dalam penelitian ini adalah proyeksi pertumbuhan penduduk hasil perhitungan Badan Kependudukan dan Keluarga Berencana Nasional (BKKBN). Hasil perhitungan ini ditunjukkan pada Tabel 2. Metode yang digunakan oleh BKKBN adalah metode komponen yang terdiri dari tingkat fertilitas, mortalitas, migrasi, dan harapan hidup.

TABEL I  
JUMLAH PENDUDUK DI JAWA DAN BALI TAHUN 2010.

No.	Provinsi	Jumlah Penduduk
1	DKI Jakarta	9.607.787
2	Jawa Barat	43.053.732
3	Jawa Tengah	32.382.657
4	DI Yogyakarta	3.457.491
5	Jawa Timur	37.476.757
6	Banten	10.632.166
7	Bali	3.890.757

TABEL II  
PROYEKSI PERTUMBUHAN PENDUDUK.

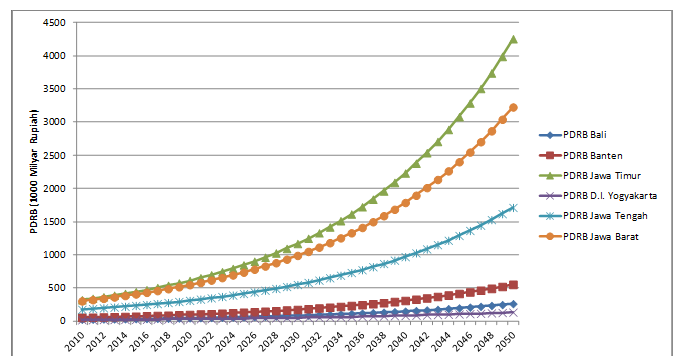
No.	Provinsi	Pertumbuhan Penduduk (%)		
		2010-2015	2015-2020	2020-2025
1	DKI Jakarta	0,41	0,20	(0,01)
2	Jawa Barat	1,60	1,45	1,27
3	Jawa Tengah	0,26	0,16	0,01
4	DI Yogyakarta	0,81	0,63	0,44
5	Jawa Timur	0,31	0,19	0,01
6	Banten	2,63	2,47	2,27
7	Bali	1,07	0,91	0,77

Aktivitas perekonomian diwakili oleh nilai Produk Domestik Regional Bruto (PDRB). Di tahun 2010, nilai

PDRB di Jawa dan Bali ditunjukkan pada Tabel 3 [16]. Asumsi pertumbuhan aktivitas ekonomi dihitung menggunakan metode proyeksi regresi linear. Hasil dari perhitungan proyeksi PDRB untuk setiap provinsi ditunjukkan pada Gbr. 1. Dari hasil perhitungan proyeksi ini, pertumbuhan PDRB Provinsi Jawa Timur memiliki rata-rata pertumbuhan yang paling tinggi selama periode proyeksi, yaitu sebesar 6,68%. Pertumbuhan PDRB paling rendah adalah Provinsi D.I. Yogyakarta dengan rata-rata pertumbuhan selama periode proyeksi sebesar 4,83%. Selanjutnya, data pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi digunakan sebagai asumsi yang menentukan permintaan energi listrik.

TABEL III  
PDRB DI JAWA DAN BALI TAHUN 2010.

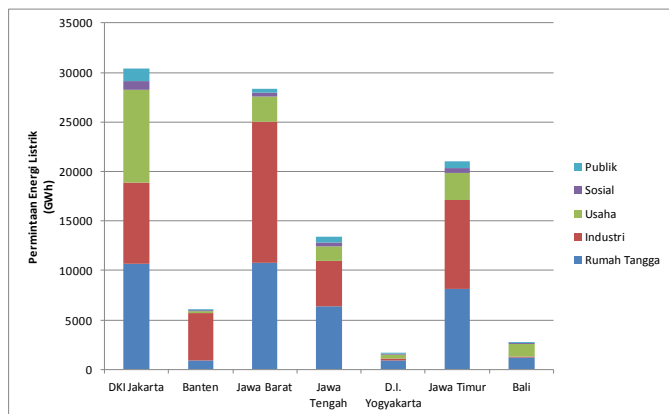
No.	Provinsi	PDRB atas dasar harga konstan 2000 (juta Rupiah)
1	DKI Jakarta	426.063.396,43
2	Jawa Barat	321.875.841,47
3	Jawa Tengah	186.995.480,65
4	Yogyakarta	21.042.267,31
5	Jawa Timur	342.280.765,51
6	Banten	57.994.870,83
7	Bali	28.880.686,20
Total Jawa-Bali		1.385.133.308,40



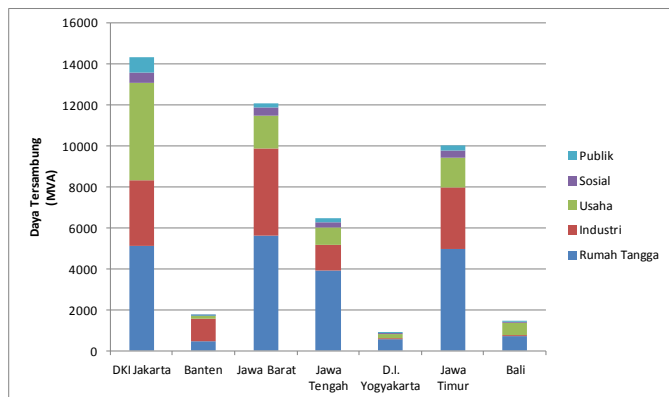
Gbr 1 Hasil proyeksi PDRB setiap provinsi.

**B. Permintaan Energi Listrik dan Kapasitas Terpasang**

Permintaan energi listrik untuk setiap provinsi di dalam sistem JAMALI ditunjukkan pada Gbr. 2. Kebutuhan energi listrik secara keseluruhan di tahun 2010 adalah sebesar 103.733,20 GWh. Permintaan energi listrik terbesar adalah Provinsi D.K.I. Jakarta dengan kebutuhan energi listrik sebesar 30.387,63 GWh atau 29,29% dari keseluruhan permintaan energi listrik pada sistem JAMALI. Sedangkan permintaan energi listrik yang paling sedikit adalah Provinsi D.I. Yogyakarta dengan kebutuhan energi listrik di tahun 2010 sebesar 1.688,86 GWh atau 1,63% dari permintaan energi listrik pada sistem JAMALI.



Gbr. 2. Permintaan energi listrik sistem JAMALI tahun 2010.

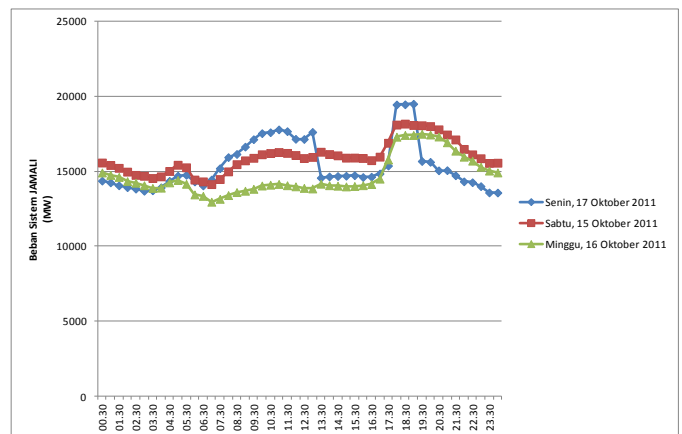


Gbr. 3. Daya tersambung per sektor sistem JAMALI tahun 2010.

Besar daya tersambung di sistem JAMALI ditunjukkan pada Gbr. 3. Daya tersambung keseluruhan sistem JAMALI di tahun 2010 adalah sebesar 47.113,94 MVA. Seiring dengan permintaan energi listrik, daya tersambung di Provinsi D.K.I. Jakarta merupakan yang terbesar pada sistem JAMALI, yaitu sebesar 14.353,00 MVA. Sedangkan daya tersambung di Provinsi D.I. Yogyakarta merupakan daya terkecil, yaitu sebesar 924,86 MVA. Sektor rumah tangga merupakan sektor dengan daya tersambung yang terbesar pada sistem JAMALI, yaitu sebesar 21.407,41 MVA.

### C. Pola Pembebanan pada Sistem JAMALI

Pola pembebanan sistem JAMALI dapat dilihat pada Gbr. 4. Data pola pembebanan ini diperoleh dari P3B Jawa-Bali. Pembebanan pada hari kerja diwakili oleh data pada Hari Senin yang diambil pada tanggal 17 Oktober 2011. Sedangkan data pembebanan sistem JAMALI pada akhir pekan adalah data pembebanan pada Hari Sabtu dan Minggu yang diambil pada tanggal 15 dan 16 Oktober 2011. Dari data pembebanan selama tiga hari ini, rata-rata beban puncak sistem JAMALI adalah sebesar 18.396,16 MW. Di dalam LEAP, *Load Duration Curve* (LDC) ini digunakan dalam menentukan pembangkit yang harus masuk ke dalam sistem JAMALI sesuai dengan metode *dispatch* yang dipilih.



Gbr. 4. Pola pembebanan pada sistem JAMALI.

### D. Rasio Elektrifikasi

Rasio elektrifikasi merupakan variabel yang sangat mempengaruhi permintaan energi listrik. Rasio elektrifikasi adalah perbandingan jumlah rumah tangga yang terhubung dengan jaringan listrik PLN dengan jumlah rumah tangga keseluruhan. Rasio elektrifikasi di tahun 2010 di setiap provinsi pada sistem JAMALI dapat dilihat pada Tabel 4. Asumsi peningkatan rasio elektrifikasi adalah mengacu pada Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 2682 tahun 2008 tentang Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional 2008 sampai dengan 2027. Dalam dokumen keputusan menteri ini, target peningkatan rasio elektrifikasi sistem ketenagalistrikan JAMALI akan mencapai 100% di tahun 2020. Dengan demikian, seluruh rumah tangga pada tahun 2020 diasumsikan akan terhubung dengan jaringan PLN. Selanjutnya, peningkatan rasio elektrifikasi ini digunakan sebagai peningkatan aktivitas energi listrik di sektor rumah tangga. Untuk sektor-sektor yang lain, rasio elektrifikasi tidak diperhitungkan. Hal ini dengan asumsi bahwa seluruh aktivitas sektor selain rumah tangga telah terhubung dengan jaringan PLN.

TABEL IV  
RASIO ELEKTRIFIKASI PADA SISTEM JAMALI.

No.	Provinsi	Rasio Elektrifikasi (%)
1.	DKI Jakarta	90,57
2.	Jawa Barat	67,13
3.	Jawa Tengah	70,29
4.	D.I. Yogyakarta	70,55
5.	Jawa Timur	65,63
6.	Banten	70,04
7.	Bali	73,71

### E. Intensitas Energi Listrik

Di dalam LEAP, permintaan energi listrik direpresentasikan menggunakan variabel yang berupa intensitas energi. Dalam hal ini, intensitas energi listrik di sektor rumah tangga

merupakan penggunaan energi listrik per kapita dalam satu tahun. Sedangkan untuk sektor selain rumah tangga, intensitas energi listrik merupakan penggunaan energi listrik per nilai tambah atau nilai PDRB untuk setiap sektor yang bersesuaian. Intensitas energi listrik untuk sektor rumah tangga dapat dilihat pada Tabel 5 dan intensitas energi listrik untuk sektor selain sektor rumah tangga dapat dilihat pada Tabel 6.

TABEL V  
INTENSITAS ENERGI LISTRIK SEKTOR RUMAH TANGGA.

No.	Provinsi	Intensitas Energi Listrik (MWh/Kapita/Tahun)
1.	DKI Jakarta	1,1271
2.	Jawa Barat	0,2534
3.	Jawa Tengah	0,1991
4.	D.I. Yogyakarta	0,2724
5.	Jawa Timur	0,2176
6.	Banten	0,0886
7.	Bali	0,3147

TABEL VI  
INTENSITAS ENERGI LISTRIK SEKTOR NON-RUMAH TANGGA.

No.	Provinsi	Intensitas Energi Listrik Sektor Non Rumah Tangga (MWh/Juta Rupiah/Tahun)			
		Industri	Komersial	Sosial	Publik
1	DKI Jakarta	0,0473	0,0511	0,0509	0,0482
2	Jawa Barat	0,0605	0,0477	0,0558	0,0608
3	Jawa Tengah	0,0401	0,0370	0,0408	0,0406
4	D.I. Yogyakarta	0,0378	0,0376	0,0376	0,0378
5	Jawa Timur	0,0403	0,0387	0,0403	0,0498
6	Banten	0,0928	0,0896	0,0880	0,1445
7	Bali	0,0572	0,0584	0,0566	0,0575

#### F. Parameter-parameter Pembangkit Listrik

Jenis-jenis pembangkit yang direncanakan dalam model LEAP dapat dilihat pada Tabel 7. Dalam Tabel 7, PLTU Batubara dan PLTGU Gas alam digunakan untuk mensuplai beban dasar bersama dengan PLTA dan PLTP. Sedangkan PLTG HSD digunakan untuk mengatasi beban puncak yang terjadi pada sistem JAMALI. Selain itu, PLTN juga disimulasikan di dalam model LEAP untuk mengatasi beban dasar.

TABEL VII  
KAPASITAS PEMBANGKIT LISTRIK YANG DITAMBAHKAN.

Addition Order	Jenis Proses Pembangkit Listrik	Kapasitas (MW)	Merit Order
1	PLTU Batubara	1.000	1
2	PLTGU Gas Alam	750	1
3	PLTN	1.000	1

4	PLTG HSD	250	3
5	PLTA	100	2
6	PLTP	110	1

TABEL VIII  
KOMPONEN BIAYA PEMBANGKIT LISTRIK MENURUT JENIS PEMBANGKIT.

No	Jenis Proses Pembangkit Listrik	Komponen biaya pembangkit listrik <sup>[1][2]</sup>			
		Kapita l (Ribu USD /MW)	O&M (Ribu USD /MW)	Variabel (USD /MWh)	Bahan bakar <sup>[2]</sup>
1.	PLTU Batubara	1.548	36	2,15	50 USD/Ton
2.	PLTGU Gas Alam	850	43	11,69	6 USD /MMBTU
3.	PLTG HSD	1.733	18	5,37	0,78 USD/Liter
4.	PLTA	1.239	15	5,97	-
5.	PLTP	1.664	30	6,37	-
6.	PLTN	2.114	95	11,06	4,4 USD/MWh

Komponen biaya untuk setiap jenis pembangkit terdiri dari biaya kapitas, operasi dan pemeliharaan (O&M), biaya variabel, dan biaya bahan bakar. Tabel 8 menunjukkan komponen biaya untuk setiap jenis pembangkit yang digunakan dalam skenario referensi dan skenario optimasi. Pada Tabel 8, pembangkit listrik dengan energi primer dari tenaga air dan panas bumi tidak memiliki biaya bahan bakar.

#### IV. SKENARIO-SKENARIO MODEL LEAP

Skenario-skenario di dalam model LEAP yang dikembangkan terdiri dari skenario dari sisi permintaan dan sisi penyediaan energi listrik, yaitu:

1. Referensi
2. Optimasi,
3. Penurunan Emisi CO<sub>2</sub>:
  - i. PLTN
  - ii. Energi Baru dan Terbarukan,

Dari sisi penyediaan energi listrik, skenario yang disusun terdiri dari skenario referensi, optimasi, dan penurunan emisi CO<sub>2</sub>. Skenario referensi mensimulasikan penambahan kapasitas pembangkit listrik untuk mempertahankan nilai *Planning Reserve Margin* (PRM) pada sistem JAMALI. Nilai PRM ini dipertahankan melalui peningkatan kapasitas pembangkit dengan metode *endogenous capacity*. Nilai PRM sistem JAMALI didasarkan pada kriteria indeks LOLP sebesar 0,274 (PLN, 2011). Dengan kriteria LOLP ini, PRM untuk sistem JAMALI adalah sebesar 20% daya mampu atau sebesar 25% daya terpasang dengan asumsi *derating factor* pembangkit listrik sebesar 5%.

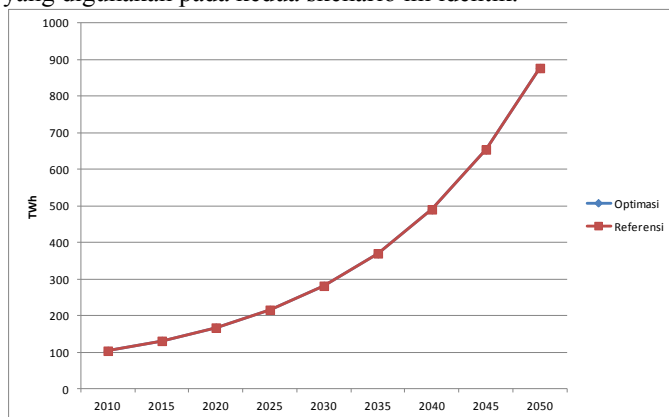
Skenario optimasi digunakan untuk mensimulasikan penentuan kapasitas dan jenis pembangkit listrik berdasarkan metode *least-cost*. Dalam skenario ini, penentuan besar kapasitas dan jenis pembangkit listrik didasarkan pada biaya operasi yang paling minimal. Biaya operasi ini terdiri dari biaya operasi dan pemeliharaan serta biaya bahan bakar.

Skenario optimasi ini selanjutnya digunakan dasar untuk menentukan parameter-parameter skenario penurunan emisi CO<sub>2</sub>. Skenario penurunan emisi CO<sub>2</sub> terdiri dari peran PLTN untuk menurunkan tingkat pertumbuhan emisi CO<sub>2</sub> dibandingkan dengan skenario optimasi. Strategi penurunan emisi CO<sub>2</sub> lainnya adalah implementasi pembangkit listrik dengan energi primer yang berasal dari energi baru dan terbarukan. Jenis energi baru yang disimulasikan adalah penggunaan *Coal Bed Methane* (CBM) sebagai salah satu pilihan selain penggunaan PLTN. Sedangkan energi terbarukan yang disimulasikan adalah energi yang berasal dari biomasa dan energi matahari.

## V. HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

### A. Permintaan Energi Listrik

Di tahun 2010, elastisitas pertumbuhan permintaan energi listrik terhadap pertumbuhan PDRB adalah 1,279. Hal ini menunjukkan penggunaan energi listrik yang belum efisien, yaitu setiap pertumbuhan PDRB sebesar 1% memerlukan pertumbuhan energi listrik sebesar 1,279%. Perbandingan permintaan energi listrik dengan menggunakan skenario referensi dan optimasi ditunjukkan pada Gbr. 5. Dengan skenario referensi dan optimasi, rata-rata pertumbuhan permintaan energi listrik per tahun adalah 5,48. Skenario referensi dan optimasi menghasilkan elastisitas pertumbuhan permintaan energi listrik terhadap pertumbuhan PDRB selama periode proyeksi akan selalu berada di atas 1 dengan rata-rata nilai elastisitas sebesar 1,28. Hasil proyeksi permintaan energi listrik berdasarkan skenario referensi dan optimasi adalah sama. Hal ini disebabkan parameter-parameter dan asumsi yang digunakan pada kedua skenario ini identik.



Gbr. 5. Hasil proyeksi permintaan energi listrik berdasarkan skenario referensi dan optimasi.

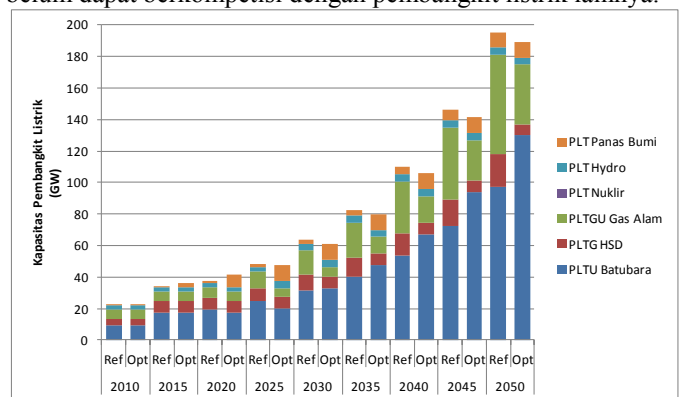
### B. Penyediaan Energi Listrik

#### 1) Kapasitas Pembangkit Listrik

Kapasitas pembangkit listrik berdasarkan jenis proses pembangkitan untuk skenario referensi dan optimasi dapat dilihat pada Gbr. 6. Dari Gbr. 6 terlihat bahwa penggunaan batubara dalam pembangkitan energi listrik masih sangat dominan di akhir tahun proyeksi. Berdasarkan skenario optimasi, kapasitas pembangkit listrik dengan bahan bakar batubara (PLTU Batubara) di tahun 2050 adalah sebesar

129,86 GW. Hasil ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan hasil perhitungan berdasarkan skenario referensi yang menghasilkan kapasitas pembangkit listrik dengan bahan bakar batubara, yaitu sebesar 97,50 GW. Berlawanan dengan batubara, kapasitas pembangkit listrik dengan bahan bakar gas alam (PLTGU Gas alam) hasil perhitungan skenario referensi lebih tinggi jika dibandingkan dengan hasil perhitungan berdasarkan skenario optimasi. Kapasitas PLTGU Gas alam berdasarkan skenario referensi dan optimasi adalah sebesar 62,97 GW dan 37,72 GW. Kapasitas pembangkit listrik dengan bahan bakar HSD (PLTG HSD) berdasarkan skenario referensi jauh lebih tinggi jika dibandingkan dengan skenario optimasi. Berdasarkan skenario referensi, kapasitas PLTG HSD adalah sebesar 20,81 GW sedangkan berdasarkan skenario optimasi hanya menghasilkan kapasitas sebesar 7,21 GW.

Hasil perhitungan kapasitas pembangkit listrik dengan energi primer yang berasal dari jenis energi terbarukan, yaitu PLTA dan PLTP, menghasilkan nilai yang sama baik untuk skenario referensi dan optimasi. Nilai kapasitas pembangkit listrik dengan menggunakan energi primer tenaga air dan panas bumi telah mencapai nilai maksimum potensi yang telah ditentukan. Di tahun 2050, kapasitas PLTA dan PLTP adalah 4,54 GW dan 10,06 GW. Berdasarkan skenario optimasi, pembangkit listrik dengan bahan bakar nuklir (PLTN) masih belum dapat berkompetisi dengan pembangkit listrik lainnya.

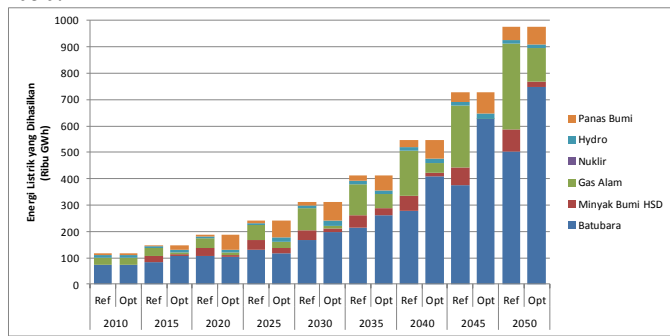


Gbr. 6. Kapasitas pembangkit listrik berdasarkan proses untuk skenario referensi dan optimasi.

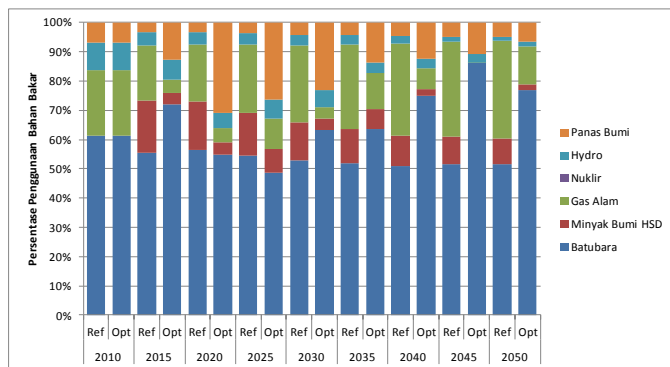
#### 2) Energi Listrik yang Dihasilkan

Di dalam model LEAP yang dikembangkan, *dispatch rule* untuk setiap jenis pembangkit listrik berdasarkan *running cost*. Metode *dispatch* ini ditentukan oleh biaya variable setiap jenis pembangkit listrik dan biaya bahan bakar. Energi listrik yang dihasilkan oleh setiap jenis pembangkit listrik untuk skenario referensi dan optimasi ditunjukkan pada Gbr. 7. Dari Gbr. 7 terlihat bahwa energi listrik yang dihasilkan dengan skenario optimasi sangat didominasi oleh PLTU Batubara, yaitu 749,22 TWh di tahun 2050 dengan rata-rata pertumbuhan sebesar 6,02% per tahun. Di tahun yang sama, energi listrik yang dihasilkan oleh PLTGU Gas alam dan PLTP dengan skenario optimasi berturut-turut adalah 126,09 TWh dan 64,23 TWh, sedangkan sisanya dihasilkan dari PLTA dan PLTG HSD berturut-turut sebesar 16,06 TWh dan 18,70 TWh. Peran pembangkit listrik berbahan bakar batubara lebih rendah

dengan skenario referensi jika dibandingkan dengan skenario optimasi. Di tahun 2050, energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik PLTU Batubara adalah 504,10 TWh. Di lain pihak, PLTGU Gas Alam dan PLTG HSD memiliki peran yang lebih tinggi dengan skenario referensi. Energi listrik yang dihasilkan oleh PLTGU Gas Alam dan PLTG HSD di tahun 2050 berturut-turut sebesar 523,53 TWh dan 83,67 TWh dengan skenario referensi. Pembangkit listrik dengan sumber energi terbarukan, yaitu PLT Hydro dan PLT Panas Bumi, memiliki peran yang lebih rendah dengan skenario referensi. PLT Hydro dan PLT Panas Bumi menghasilkan energi listrik berturut-turut sebesar 13,03 TWh dan 48,05 TWh di tahun 2050.



Gbr. 7. Energi listrik yang dihasilkan berdasarkan proses pembangkitan energi listrik untuk skenario referensi dan optimasi.



Gbr. 8. Persentase energi listrik yang dihasilkan berdasarkan proses pembangkitan energi listrik untuk skenario referensi dan optimasi.

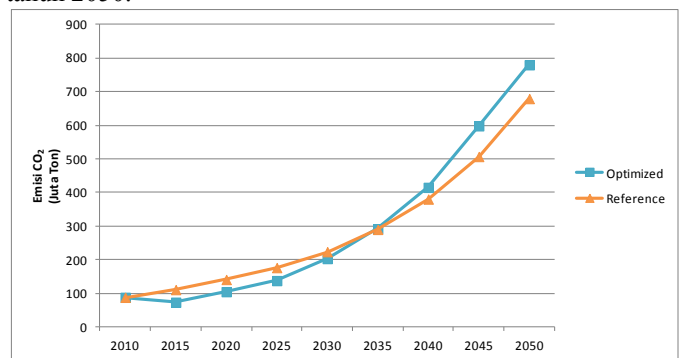
Persentase energi listrik yang dihasilkan berdasarkan proses pembangkitan energi listrik ditunjukkan pada Gbr. 8. Berdasarkan skenario optimasi, persentase energi listrik yang dihasilkan oleh PLTU Batubara 67,27% di tahun 2010 dan akan terus turun sampai pada persentase sebesar 42,40% di tahun 2022. Selanjutnya, persentase energi listrik yang dihasilkan dari PLTU Batubara akan naik lagi mencapai 76,90% di tahun 2050. Penurunan persentase energi listrik dalam periode 2010 sampai 2022 disebabkan penambahan kapasitas PLTA dan PLTP yang disegerakan dalam skenario optimasi. Namun demikian, penambahan kapasitas PLTA dan PLTP berhenti berturut-turut di tahun 2015 dan 2021 yang disebabkan kedua pembangkit listrik ini telah mencapai kapasitas yang sama dengan potensi sumber tenaga air dan panas bumi di dalam sistem JAMALI. Persentase energi listrik yang dihasilkan oleh PLTA mencapai nilai maksimal di tahun

2016, yaitu sebesar 10,20% sedangkan nilai persentase energy listrik yang dihasilkan oleh PLTP mencapai maksimal di tahun 2023, yaitu sebesar 27,48%.

### 3) Analisis Dampak Lingkungan

Analisis dampak lingkungan yang difokuskan pada potensi pemanasan global yang ditimbulkan oleh emisi CO<sub>2</sub> dalam proses pembangkitan energi listrik. Perhitungan emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan untuk setiap proses pembangkitan energi listrik didasarkan pada *technology and environment database* (TED) yang terdapat di dalam perangkat lunak LEAP. Data yang terdapat di dalam TED-LEAP ini meliputi karakteristik teknis, biaya, dan dampak lingkungan dari berbagai macam jenis teknologi energi. Data tentang dampak lingkungan di dalam TED-LEAP berasal dari penelitian yang dilaksanakan oleh *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC).

Emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari proses pembangkitan energi listrik berdasarkan skenario-skenario yang telah disusun dapat dilihat pada Gbr. 9. Dari Gbr. 9 terlihat bahwa skenario optimasi menghasilkan pertumbuhan emisi CO<sub>2</sub> yang paling besar jika dibandingkan dengan skenario referensi. Hal ini disebabkan oleh peran PLTU Batubara yang lebih besar dengan skenario optimasi jika dibandingkan dengan skenario referensi dalam pembangkitan energi listrik. Rata-rata pertumbuhan emisi CO<sub>2</sub> dengan skenario optimasi adalah sebesar 5,60% per tahun. Hal ini menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> di tahun 2050 sebesar 779,84 Juta Ton CO<sub>2</sub> dari 88,05 Juta Ton CO<sub>2</sub> di tahun 2010. Rata-rata pertumbuhan emisi CO<sub>2</sub> hasil dari skenario optimasi sedikit lebih tinggi jika dibandingkan dengan rata-rata pertumbuhan emisi CO<sub>2</sub> hasil dari skenario referensi. Berdasarkan skenario referensi, rata-rata pertumbuhan emisi CO<sub>2</sub> adalah 5,24% per tahun yang mengakibatkan emisi CO<sub>2</sub> sebesar 679,31 Juta Ton CO<sub>2</sub> di tahun 2050.



Gbr. 9. Emisi CO<sub>2</sub> berdasarkan skenario referensi dan optimasi.

### C. Strategi Penurunan Emisi CO<sub>2</sub>

Di bagian sebelumnya telah dibahas skenario optimasi yang dapat menentukan sistem pembangkitan energi listrik dengan biaya yang terendah. Namun demikian, hasil skenario optimasi memiliki emisi CO<sub>2</sub> yang tinggi jika dibandingkan dengan skenario referensi. Oleh karena itu, perlu adanya strategi-strategi yang dapat digunakan untuk mengurangi emisi CO<sub>2</sub> dalam sistem pembangkitan energi listrik di JAMALI. Di bagian ini akan dibahas beberapa strategi yang dapat dilakukan untuk menurunkan tingkat emisi CO<sub>2</sub>.

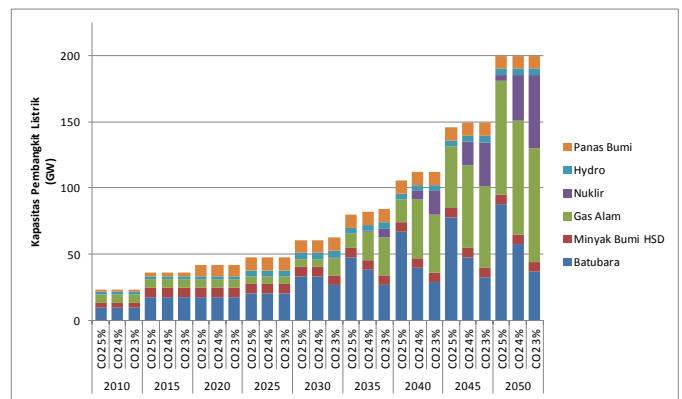
Strategi-strategi tersebut diantaranya adalah implementasi PLTN dalam pembangkitan energi listrik di sistem JAMALI, implementasi energi baru dan terbarukan jika skenario penggunaan PLTN tidak dapat dilakukan.

### 1) Skenario Implementasi PLTN

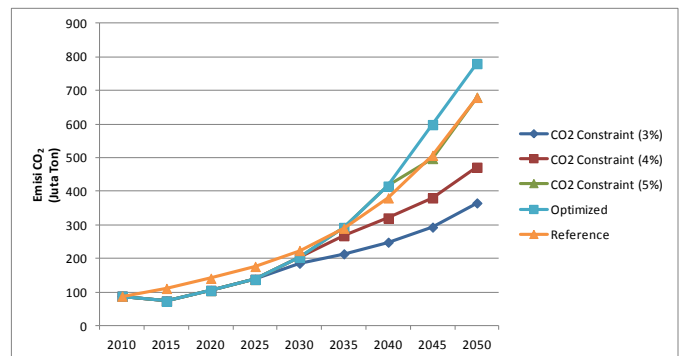
Perhitungan dengan skenario optimasi dalam penentuan kapasitas pembangkit listrik yang diperlukan menghasilkan PLTN masih belum dapat berkompetisi dengan jenis pembangkit lainnya. Namun demikian, jika emisi CO<sub>2</sub> merupakan salah satu faktor yang harus dibatasi maka PLTN akan dapat berperan penting dalam penurunan emisi CO<sub>2</sub> di sektor pembangkitan energi listrik. Dalam simulasi ini, emisi CO<sub>2</sub> dibatasi pada tingkat pertumbuhan 3%, 4%, dan 5% per tahun. Penentuan pembatasan ini untuk mencapai target penurunan emisi CO<sub>2</sub> sebesar 41% sesuai dengan RAN-GRK.

Gbr. 10 memperlihatkan bahwa semakin rendah tingkat pertumbuhan yang diperbolehkan PLTN yang dibutuhkan akan semakin besar. Dengan menerapkan skenario pembatasan emisi CO<sub>2</sub>, PLTN dapat berkompetisi dengan pembangkit listrik lainnya. Dari Gbr. 10 terlihat bahwa semakin rendah pembatasan emisi CO<sub>2</sub> PLTN semakin cepat untuk dibangun. Dengan pembatasan emisi CO<sub>2</sub> dengan rata-rata pertumbuhan 3% per tahun, PLTN mulai dibangun pada tahun 2027 dengan kapasitas sebesar 1 MW. Sedangkan dengan pembatasan emisi CO<sub>2</sub> dengan rata-rata pertumbuhan 4% dan 5% per tahun, PLTN mulai dibangun pada tahun 2032 dan 2041 dengan masing-masing kapasitas sebesar 0,64 MW dan 0,14 MW. Di tahun 2050, kapasitas PLTN untuk mencapai target rata-rata pertumbuhan emisi CO<sub>2</sub> 3%, 4%, dan 5% per tahun berturut-turut adalah 72,81 GW, 50,59 GW, dan 50,59 GW. Sedangkan kapasitas PLTU Batubara di tahun 2050 adalah 65,73 GW, 87,94 GW, dan 87,94 GW untuk skenario pembatasan emisi CO<sub>2</sub> 3%, 4%, dan 5%. Untuk ketiga skenario pembatasan emisi CO<sub>2</sub>, kapasitas PLTGU Gas alam dan PLTG HSD di tahun 2050 memiliki nilai yang sama, yaitu berturut-turut sebesar 50,34 GW dan 7,21 GW. Demikian juga, penggunaan PLTA dan PLTP di tahun 2050 memiliki besar kapasitas yang sama untuk ketiga skenario pembatasan emisi CO<sub>2</sub>, yaitu berturut-turut sebesar 4,5 GW dan 10,06 GW.

Perbandingan emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh skenario pembatasan emisi CO<sub>2</sub> dengan skenario referensi dan optimasi diperlihatkan pada Gbr. 11. Pada Gbr. 11 terlihat bahwa semakin besar peran PLTN dalam penyediaan energi listrik emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan akan semakin rendah. Dengan pembatasan emisi CO<sub>2</sub> pada tingkat pertumbuhan sebesar 3% per tahun, emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan di tahun 2025 adalah 365,24 Juta Ton CO<sub>2</sub>. Jumlah emisi CO<sub>2</sub> ini lebih rendah 53,16% jika dibandingkan dengan jumlah emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh skenario optimasi. Dengan pembatasan emisi CO<sub>2</sub> dengan tingkat pertumbuhan sebesar 4% dan 5% per tahun, emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan akan lebih rendah berturut-turut 39,56% dan 12,86% di tahun 2050 jika dibandingkan dengan skenario optimasi.



Gbr. 10. Kapasitas pembangkit listrik berdasarkan proses untuk skenario pembatasan emisi CO<sub>2</sub> dengan implementasi PLTN.



Gbr. 11. Perbandingan emisi CO<sub>2</sub> antara skenario pembatasan emisi CO<sub>2</sub> dengan implementasi PLTN dan skenario referensi dan optimasi.

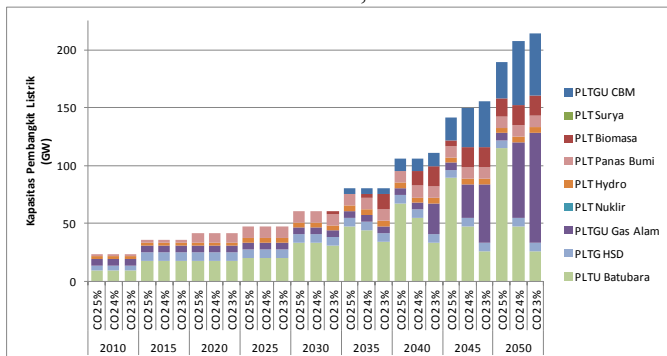
### 2) Skenario Energi Baru dan Terbarukan

Salah satu strategi penurunan emisi CO<sub>2</sub> adalah dengan mengimplementasikan energi baru dan terbarukan sebagai energi primer dari proses pembangkitan energi listrik. Dengan pembatasan emisi CO<sub>2</sub> seperti yang telah dilakukan dengan implementasi PLTN, peran energi baru dan terbarukan juga dapat dioptimalkan untuk menurunkan emisi CO<sub>2</sub> di sektor pembangkitan energi listrik. Jenis energi baru yang disimulasikan adalah penggunaan CBM sebagai energi primer pembangkit listrik. Jenis energi terbarukan selain dari tenaga air dan panas bumi yang disimulasikan adalah energi yang berasal dari limbah pertanian dan perkebunan dalam bentuk energi biomasa. Selain itu, energi matahari juga disimulasikan dalam skenario ini.

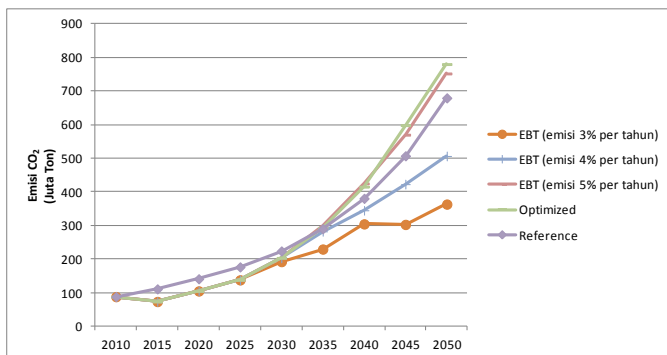
Gbr. 12 memperlihatkan peran energi baru dan terbarukan dalam penurunan emisi CO<sub>2</sub>. Untuk mencapai target yang sama seperti pada implementasi PLTN, PLT Biomasa dan PLTGU CBM harus dibangun untuk mengganti PLTN. Sedangkan PLTS tidak dapat berkompetisi dengan jenis pembangkit listrik lainnya. Dari hasil simulasi, PLT Biomasa mulai dibangun pada tahun 2029 dengan kapasitas sebesar 1,04 GW dan mencapai kapasitas maksimum di tahun 2036, yaitu sebesar 17,53 GW. PLTGU CBM mulai dibangun pada tahun 2031 dengan kapasitas sebesar 0,68 GW dan di tahun 2050 kapasitas PLTGU CBM yang harus dibangun adalah 47,17 GW. Selain itu, PLTGU Gas Alam memiliki kapasitas yang harus dibangun lebih tinggi jika dibandingkan dengan



kapasitas PLTGU Gas Alam pada skenario referensi dan optimasi. Di tahun 2050, PLTGU Gas Alam yang harus dibangun adalah 99,75 GW. Di lain pihak, PLTU Batubara mencapai kapasitas maksimal sebesar 32,82 GW di tahun 2032 dan mulai menurun di tahun 2040. Kapasitas PLTU Batubara di tahun 2050 adalah 27,40 GW.



Gbr. 12. Kapasitas pembangkit listrik berdasarkan proses untuk skenario pembatasan emisi CO<sub>2</sub> dengan implementasi energi baru dan terbarukan.



Gbr. 13. Perbandingan emisi CO<sub>2</sub> antara skenario pembatasan emisi CO<sub>2</sub> dengan implementasi energi baru dan terbarukan dan skenario referensi dan optimasi.

Dengan implementasi energi baru dan terbarukan, emisi CO<sub>2</sub> dapat diturunkan pada tingkat yang hampir sama dengan skenario yang mengimplementasikan PLTN sebagai salah satu pembangkit listrik yang harus dibangun pada sistem JAMALI. Emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh skenario energi baru dan terbarukan ditunjukkan pada Gbr. 13. Dengan memanfaatkan potensi biomassa secara maksimal, rata-rata pertumbuhan emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dapat mencapai 3,61% per tahun. Sehingga, emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan di tahun 2050 mencapai nilai yang hampir sama dengan implementasi PLTN, yaitu sebesar 363,24 Juta Ton CO<sub>2</sub>. Jika dibandingkan dengan skenario optimasi, implementasi energi baru dan terbarukan dapat menurunkan emisi CO<sub>2</sub> sebesar 53,42%.

## VI. KESIMPULAN DAN SARAN

### A. Kesimpulan

Berdasarkan asumsi makro ekonomi yang telah ditentukan, permintaan energi listrik pada sistem JAMALI di tahun 2050 mencapai 876,87 TWh dengan rata-rata pertumbuhan sebesar 5,48% per tahun. Berdasarkan provinsi, rata-rata pertumbuhan energi listrik tertinggi adalah Provinsi Banten dengan

pertumbuhan sebesar 6,17% per tahun dan terendah adalah Provinsi D.I. Yogyakarta dengan pertumbuhan sebesar 4,74% per tahun. Berdasarkan sektor aktivitas, sektor industri memiliki permintaan energi listrik tertinggi di tahun 2050, yaitu sebesar 510,48 TWh dengan rata-rata pertumbuhan sebesar 6,5% per tahun.

Hasil perhitungan skenario referensi dan optimasi, kapasitas PLTU Batubara lebih tinggi jika dibandingkan dengan kapasitas pembangkit listrik lainnya. Di tahun 2050, kapasitas PLTU Batubara dengan skenario referensi dan optimasi berurut-turut adalah 97,5 GW dan 129,86 GW.

Melalui skenario optimasi, peran PLTU Batubara dalam pembangkitan energi listrik sangat dominan, yaitu 76,90% dari keseluruhan energi listrik yang dibangkitkan di tahun 2050. Sedangkan dengan skenario referensi, peran PLTU Batubara 51,73%. Energi listrik yang dibangkitkan oleh PLTGU Gas Alam dengan skenario optimasi lebih rendah jika dibandingkan yang dibangkitkan dengan skenario referensi, yaitu 12,94% dan 33,41%.

Rata-rata pertumbuhan emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh skenario optimasi adalah 5,60% per tahun yang lebih tinggi dari emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dengan skenario referensi yang memiliki rata-rata pertumbuhan sebesar 5,24% per tahun. Dengan demikian, emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh skenario optimasi di tahun 2050 adalah 779,84 Juta Ton CO<sub>2</sub> yang lebih tinggi 14,79% dari emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh skenario referensi.

Peran PLTN dalam penurunan emisi CO<sub>2</sub> sangat besar. Dengan implementasi PLTN, rata-rata pertumbuhan emisi CO<sub>2</sub> di sistem JAMALI dapat ditekan hingga mencapai 3,62% per tahun. Namun demikian, biaya yang diperlukan untuk implementasi PLTN sangat tinggi jika dibandingkan dengan skenario optimasi. Rata-rata pertumbuhan emisi CO<sub>2</sub> yang hampir sama dengan skenario PLTN dapat dicapai dengan memaksimalkan potensi energi baru dan terbarukan yang berupa CBM dan energi biomassa. Dengan implementasi energi baru dan terbarukan, rata-rata pertumbuhan emisi CO<sub>2</sub> di sistem JAMALI dapat ditekan sampai 3,61% per tahun.

### B. Saran

Model LEAP yang telah disusun dapat dikembangkan lebih lanjut dengan mengakomodasi data penggunaan energi listrik yang lebih rinci. Dalam model LEAP yang telah disusun, penggunaan energi listrik dimodelkan hanya berdasarkan sektor aktivitas. Model ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menjabarkan penggunaan energi listrik setiap sektor berdasarkan jenis teknologi yang memanfaatkan energi listrik untuk menjalankan suatu aktivitas atau proses. Dengan model semacam ini, pola penggunaan energi listrik dapat diamati dengan lebih baik dan dapat digunakan sebagai dasar penyusunan strategi konversi energi.

Penggunaan asumsi makro ekonomi sebagai variabel penggerak permintaan energi listrik harus tetap dimutakhirkan terutama dalam simulasi sistem energi dalam periode waktu yang sangat lama.

## REFERENSI

- [1] IEA, "Key World Energy Statistics," Paris, 2010.
- [2] DJLPE, Statistik Ketenagalistrikan dan Energi Tahun 2008, Jakarta: DJLPE 22-2009, 2009.
- [3] IEA, "Energy Policy Review of Indonesia," International Energy Agency, Paris, 2008.
- [4] D. V. Hippel and P. Hayes, "Two Scenarios of Nuclear Power and Nuclear Waste Production in Northeast Asia," Yonsei University Department of Political Science, Yonsei, 1997.
- [5] B. Limmeechokchai and P. Chaouangroen, "Energy Saving Potential in the Thai Commercial and Industrial Sectors: Long-range Energy Alternatives Planning in the Small Buildings and Industries," in *The 2nd Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)"*, Bangkok, 2006.
- [6] M. H. Sahir and A. H. Qureshi, "Specific Concerns of Pakistan in the Context of Energy Security Issues and Geopolitics of the Region," *Energy Policy*, pp. 134-140, 2007.
- [7] M. E. Wijaya and B. Limmeechokchai, "Optimization of Indonesian Geothermal Energy Resources for Future Clean Electricity Supply: A Case of Java-Madura-Bali System," *IIRE International Journal of Renewable Energy*, 2009.
- [8] W. Wangjiraniran and B. Euaarporn, "A Study in Fuel Options for Power Generation in Thailand," *Engineering Journal*, pp. 35-44, 2010.
- [9] E. S. Karapidakis et al., "Generation Expansion Planning of Crete Power System for High Penetration of Renewable Energy Sources," *Materials Science Forum*, pp. 407-414, 2011.
- [10] R. KUHI-THALFELDT and J. VALTIN, "The Potential and Optimal Operation of Distributed Power Generation in Estonia," *Oil Shale*, p. 240-252, 2011.
- [11] B. Limmeechokchai, S. Tanatvanit and S. Chungpaibulpatana, "Energy Conservation and CO2 Emission Mitigation in Thailand," in *2nd Regional Conference on Energy Technology Towards a Clean Environment*, Phuket, 2003.
- [12] W. Cai et al., "Comparison of CO2 emission scenarios and mitigation opportunities in China's five sectors in 2020," *Energy Policy*, p. 1181-1194, 2008.
- [13] Y. Tanotoa and M. E. Wijaya, "Economic and Environmental Emissions Analysis in Indonesian Electricity Expansion Planning: Low-rank Coal and Geothermal Energy Utilization Scenarios," in *IEEE First Conference on Clean Energy and Technology (CET)*, Bangkok, 2010.
- [14] A. Phdungsilp and T. Wuttiornpun, "Energy and Carbon Modeling with Multi-Criteria Decision-Making towards Sustainable Industrial Sector Development in Thailand," *Low Carbon Economy*, pp. 165-172, 2011.
- [15] C. Heaps, Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) system. [Software version 2011.0.0.43], Somerville: Stockholm Environment Institute [www.energycommunity.org], 2012.
- [16] BPS, "Data Strategis BPS tahun 2010," Badan Pusat Statistik, Jakarta, 2011.
- [17] PLN, "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik," P.T. PLN (Persero), Jakarta, 2011.