

## STUDI EMISI KARBON SISTEM PEMBANGKITAN BALI

IWA WINARTA, IAD GIRIANTARI, IWG ARIASTINA

Program Studi Magister Teknik Elektro, Program Pasca Sarjana, Universitas Udayana

Jl. Panglima Besar Sudirman Denpasar, Bali

Email: [lonzorock@gmail.com](mailto:lonzorock@gmail.com)

### Abstrak

Industri kelistrikan merupakan salah satu penyumbang emisi karbon untuk udara di Indonesia. Gas buang dari pembangkit-pembangkit listrik berbahan bakar fosil turut serta memberi dampak pada kerusakan lingkungan. Indonesia telah melakukan berbagai upaya untuk mengurangi emisi karbon. Dalam Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik PT. PLN (Persero) tahun 2011-2020 untuk penguatan pasokan sistem Bali memberikan peluang untuk mengurangi emisi karbon untuk daerah Bali, dengan beberapa skenario operasi sistem pembangkitan Bali. Pemerintah Indonesia juga berencana untuk memberlakukan pajak karbon pada tahun 2014 untuk mengurangi emisi karbon Indonesia. Tujuan dari studi ini adalah untuk mendapatkan total emisi karbon sistem pembangkitan Bali dengan diterapkan beberapa skenario operasi yang berbeda serta pajak karbon yang seharusnya dibayar sistem pembangkit Bali. Enam buah skenario pola operasi disusun dengan kombinasi pengoperasian pembangkit yang tersedia dalam sistem pembangkitan Bali. Perhitungan emisi masing-masing skenario dilakukan sehingga mampu memberikan pengetahuan tentang emisi karbon sistem Bali, pemilihan pola operasi pembangkitan yang tepat untuk sistem pembangkit Bali dengan emisi karbon minimum serta memberikan gambaran yang dapat digunakan untuk perencanaan sistem pembangkit yang mampu mengurangi polusi karbon. Dari hasil analisis dan perhitungan dapat disimpulkan bahwa pola operasi skenario 6 dengan pembebanan maksimum pada kabel laut dan Jawa Bali Crossing memiliki emisi karbon terendah daripada pola operasi skenario lainnya. Pengoperasian kabel laut, PLTU Celukan Bawang serta Jawa Bali Crossing akan menghasilkan emisi karbon yang lebih rendah dari pembangkit yang beroperasi di Bali, sehingga untuk mendapatkan emisi karbon yang lebih rendah pembangkit Bali harus dibebankan setelah pembebanan kabel laut, PLTU Celukan Bawang serta Jawa Bali Crossing untuk menyuplai kebutuhan energi listrik Bali.

*Kata kunci*— Kabel laut, PLTU Celukan Bawang, Jawa Bali Crossing

### 1. PENDAHULUAN

Polutan yang dihasilkan pada pembakaran fosil merupakan faktor terbesar terjadinya asap, hujan asam, pemanasan global dan perubahan iklim [1]. Penggunaan energi fosil akan menghasilkan emisi seperti: partikel, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, dan CO<sub>2</sub>. Emisi partikel, SO<sub>2</sub>, dan NO<sub>x</sub> adalah bahan polutan yang berhubungan langsung dengan kesehatan manusia. Disamping itu, masyarakat internasional juga menaruh perhatian terhadap isu lingkungan global seperti terjadinya pemanasan global. Gas CO<sub>2</sub> merupakan salah satu gas rumah kaca, yang mengakibatkan pemanasan global [2].

Indonesia juga telah melakukan berbagai upaya untuk mengurangi emisi karbon. Berdasarkan *Economic and Fiscal Policy Strategies for Climate Change Mitigation in Indonesia* yang dirilis Kementerian Keuangan, Pemerintah Indonesia berencana untuk memberlakukan pajak karbon pada tahun 2014. Pajak karbon sejumlah Rp 80.000 setiap ton emisi CO<sub>2</sub> akan diterapkan dan dijadwalkan naik 5% setiap tahun [3].

Sistem pembangkitan Bali saat ini masih menggunakan BBM, berupa unit-unit PLTD dan PLTG memiliki efek negatif terhadap lingkungan. Gas buang karbon dari Pembangkit menyumbang polusi untuk udara daerah Bali. Rencana dari PLN untuk memenuhi kebutuhan pasokan listrik yang tertuang dalam RUPTL 2011-2020 memberikan peluang untuk mengurangi emisi karbon untuk daerah Bali, dengan beberapa skenario operasi

pembangkit sistem Bali. Proyeksi emisi CO<sub>2</sub> dari sistem Jawa Bali, emisi naik dari 110 juta ton pada 2011 menjadi 205 juta ton pada 2020, atau naik hampir 2 kali lipat. *Grid emission factor* membaik dari 0,778 kgCO<sub>2</sub>/kWh pada 2011 menjadi 0,756 kgCO<sub>2</sub>/kWh pada 2020. Perbaikan faktor emisi ini dicapai dari peningkatan pemakaian gas alam, panas bumi dan penggunaan teknologi *supercritical*[4].

Skenario operasi untuk emisi didapatkan dengan mengoperasikan pembangkit yang memiliki emisi per kWh terendah sampai tertinggi untuk menyuplai kebutuhan beban pada periode waktu tertentu. Dalam menentukan emisi karbon Sistem Pembangkitan Bali akan dihitung berdasarkan emisi per kWh masing-masing pembangkit yang nantinya dapat memperlihatkan karakteristik emisi masing-masing pembangkit. Beberapa skenario operasi dirancang untuk memperoleh emisi yang terendah.

Berdasarkan permasalahan diatas, maka dalam penelitian ini akan dibahas mengenai besarnya emisi karbon sistem pembangkitan Bali dengan beberapa skenario operasi, sehingga diperoleh skenario operasi dengan emisi karbon terendah dalam peranan menjaga kelestarian lingkungan kawasan Bali.

### 2. PENYEDIAAN TENAGA LISTRIK BALI

#### 2.1 Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. PLN (Persero) 2011-2020

Untuk sistem kelistrikan Jawa-Bali, PLN telah merencanakan PLTU batubara kelas 1.000 MW dengan teknologi *ultra super critical* untuk memperoleh efisiensi yang lebih baik dan emisi CO<sub>2</sub>

yang lebih rendah. Penggunaan ukuran unit sebesar ini juga dimaksudkan untuk memperoleh manfaat dari *economies of scale* dan didorong oleh semakin sulitnya memperoleh lahan untuk membangun pusat pembangkit skala besar dipulau Jawa. Pertimbangan lainnya adalah ukuran sistem Jawa Bali telah cukup besar untuk mengakomodasi unit pembangkit kelas 1.000 MW[4].

Kebijakan pengembangan kapasitas pembangkit dan kriteria perencanaan pembangkit, belum memperhitungkan biaya emisi CO<sub>2</sub> sebagai salah satu variabel biaya. Namun demikian, RUPTL ini tidak mengabaikan aspek emisi CO<sub>2</sub>. Hal ini dibuktikan dengan banyaknya kandidat PLTP dan PLTA yang ditetapkan masuk dalam sistem kelistrikan walaupun mereka bukan merupakan solusi biaya terendah. Penggunaan teknologi boiler *supercritical* di pulau Jawa juga membuktikan bahwa PLN peduli dengan upaya mengurangi emisi CO<sub>2</sub> dari pembangkitan tenaga listrik. Banyaknya emisi dihitung dari jumlah bahan bakar yang digunakan dan dikonversi menjadi emisi CO<sub>2</sub> (dalam ton CO<sub>2</sub>) dengan menggunakan faktor pengali (*emission factor*) yang diterbitkan oleh IPCC.

Pemerintah telah menetapkan Perpres No. 4 tahun 2010 dan Permen ESDM No. 15 tahun 2010 mengenai Program Percepatan Pembangkit Tahap 2. Program tersebut didominasi oleh pembangkit dengan menggunakan energi terbarukan, khususnya panas bumi. Dengan adanya intervensi kebijakan pemerintah mengenai pengembangan PLTP dan energi terbarukan lainnya akan menghasilkan rencana pengembangan pembangkit yang sedikit berbeda dibandingkan dengan baseline serta dapat menurunkan emisi CO<sub>2</sub>.

Emisi CO<sub>2</sub> se-Indonesia akan meningkat dari 141 juta ton pada 2011 menjadi 276 juta ton pada tahun 2020. Dari 276 juta ton emisi tersebut, 245 juta ton (89%) berasal dari pembakaran batubara. *Average grid emission factor* untuk Indonesia pada tahun 2011 adalah 0,763 kgCO<sub>2</sub>/kWh, akan meningkat menjadi 0,8 kgCO<sub>2</sub>/kWh pada 2013-2014 dan selanjutnya akan menurun karena beroperasinya proyek-proyek PLTP dan PLTA sehingga *average grid emission factor* pada tahun 2020 menjadi 0,745 kgCO<sub>2</sub>/kWh[4].

Proyeksi emisi CO<sub>2</sub> dari sistem Jawa Bali, emisi naik dari 110 juta ton pada 2011 menjadi 205 juta ton pada 2020, atau naik hampir 2 kali lipat. *Grid emission factor* membaik dari 0,778 kgCO<sub>2</sub>/kWh pada 2011 menjadi 0,756 kgCO<sub>2</sub>/kWh pada 2020. Perbaikan faktor emisi ini dicapai dari peningkatan pemakaian gas alam, panas bumi dan penggunaan teknologi *supercritical*[4].

Sekitar 25% dari total emisi karbon dunia dihasilkan oleh pembangkit listrik. Sebuah lembaga riset independen yang berbasis di Amerika, CGD (*Center for Global Development*) melakukan penelitian mengenai besar emisi karbon yang dihasilkan oleh negara-negara di dunia. CGD

mengumpulkan data dari sekitar 50.000 pembangkit listrik di seluruh dunia dan mengumpulkannya dalam suatu database yang disebut CARMA (*Carbon Monitoring For Action*) [5].

Data yang dikumpulkan dalam CARMA berasal dari laporan pemerintah dan pembangkit itu sendiri. Bila data yang diperoleh masih kurang, CARMA melakukan perkiraan emisi dengan metode statistik berdasarkan jenis dan umur pembangkit listrik, bahan bakar yang digunakan, serta jumlah energi yang di hasilkan. CARMA berhasil mengumpulkan daftar negara penghasil emisi CO<sub>2</sub> terbesar dari sektor pembangkit listrik serta daftar pembangkit listrik di seluruh dunia yang paling banyak menghasilkan emisi CO<sub>2</sub>.

Dari penelitian yang dilakukan tersebut, Indonesia berada pada urutan 18 sebagai penyumbang emisi karbon di dunia. Lima besar penyumbang terbesar emisi karbon di dunia adalah berturut-turut Amerika Serikat, China, Rusia, India dan Jepang. Pembangkit Suralaya merupakan salah satu pembangkit Indonesia yang menduduki peringkat 11 dari daftar pembangkit di dunia yang memiliki emisi karbon terbesar di dunia [5].

Untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik Bali diperlukan pembangunan sarana pembangkit, transmisi dan distribusi. Provinsi Bali memiliki potensi energi yang dapat dikembangkan untuk pembangkit tenaga listrik terdiri dari tenaga air sebesar kurang lebih 20 MW dan panas bumi sebesar 296 MWe yang tersebar di 5 lokasi. Kebutuhan bahanbakar untuk pembangkit di Bali harus dikirim dari provinsi lain, meliputi BBM seperti saat ini, batubara terkait dengan PLTU Celukan Bawang dan kemungkinan mini LNG ke Pesanggaran sesuai dengan kelayakan keekonomiannya. Untuk memenuhi sebagian dari kebutuhan listrik Bali hingga tahun 2020, direncanakan tambahan pembangkit sebesar 394 MW yang terdiri dari pembangkit batubara dan panas bumi.

Proyek PLTU Bali Timur yang sebelumnya direncanakan dalam RUPTL 2010-2019 dibatalkan karena pembangunan transmisi Jawa Bali Crossing 500 kV telah diputuskan untuk dilaksanakan, sehingga sistem kelistrikan Bali akan dapat dipenuhi oleh kabel laut Jawa-Bali sirkuit 3-4 (2x100 MW), PLTU Celukan Bawang (380 MW) dan transmisi 500 kV Jawa-Bali Crossing[4].

## 2.2 Perhitungan Emisi Karbon pada Pembangkit Listrik

Dalam penelitian ini perhitungan emisi karbon yang digunakan adalah , faktor emisi, dan database yang digunakan oleh Kemitraan perhitungan dari *Regional Carbon Sequestration Partnerships* (RCSPs). Data dianalisis berdasarkan metodologi IPCC GRK tahun 2006 menggunakan data konsumsi bahan bakar, koefisien karbon bahan bakar khusus, dan fraksi bahan bakar yang berhubungan dengan karbon teroksidasi. Emisi CO<sub>2</sub> dihitung melalui

pembakaran bahan bakar berdasarkan jenis dan penggunaan data yang diberikan oleh *Transfer Technology Network* (TTN). Berikut rumus emisi karbon untuk tipe pembangkit listrik [6]: untuk bahan bakar cair atau gas

$$MCO_2 = \frac{3,664 F_t C_{\%} D_F}{2,000}, \dots\dots\dots (1)$$

untuk bahan bakar padat

$$MCO_2 = 3,664 F_t C_{\%} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:

$MCO_2$ : Jumlah emisi karbon per tahun (ton per tahun)

$F_t$  : Tingkat penggunaan bahan bakar (*Fuel Usage Rate*, galon per tahun jika cair, scf juta per tahun jika gas; ton per tahun jika padat)

$C_{\%}$  : Persentase *Carbon in fuel*

$D_F$  : *Fuel density* (lb per galon jika cairan, lb per juta scf jika gas)

**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**3.1 Pengoperasian Pembangkit tahun 2012**

Total pemakaian bahan bakar serta produksi listrik masing-masing pembangkit pada tahun 2012 dapat dilihat pada tabel 1. total penggunaan bahan bakar seluruh pembangkit pada tahun 2012 adalah sebesar 698.355.342 liter dengan produksi listrik sebesar 2.331.641.505 kWh

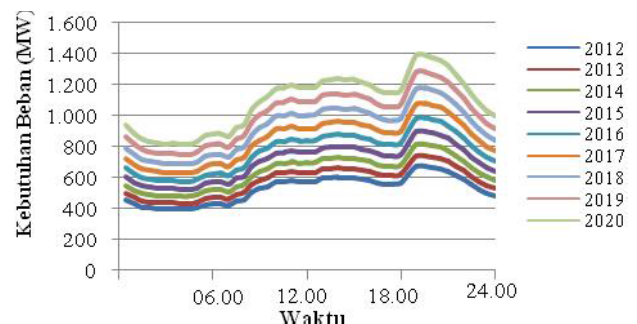
**Tabel 1. Pemakaian Bahan Bakar Dan Produksi Listrik Tahun 2012**

Pembangkit	Pemakaian HSD (Liter)	Produksi Listrik (kWh)
PLTD-M Pesanggaran 10	11.374.001	42.314.700
PLTD-M Pesanggaran 11	12.117.762	44.276.500
PLTG-M Pesanggaran 1	16.165.677	34.679.300
PLTG-M Pesanggaran 2	16.122.085	34.942.200
PLTG-M Pesanggaran 3	76.861.007	197.445.100
PLTG-M Pesanggaran 4	46.827.813	123.986.600
PLTG-M Gilimanuk 1	203.659.027	601.744.000
PLTG-M Pemaron 2	12.152.678	31.121.708
BOO 30 MW PESANGGARAN	40.748.046	169.228.092
BOT 50 MW PESANGGARAN	78.934.881	352.119.464
BOO 45 MW PEMARON Blok 1-2	81.592.080	310.874.208
BOO 20 MW PEMARON Blok 3-4	29.771.346	114.278.052
BOO 15 MW PEMARON Blok 5-6	21.955.880	86.064.811
BOO 45 MW PEMARON Blok 7-8	50.073.059	188.566.772
<b>TOTAL</b>	<b>698.355.342</b>	<b>2.331.641.505</b>

Pada tahun 2013 terdapat tambahan pengoperasian pembangkit PLTD C 50 MW Pesanggaran dan PLTD D 45 Pesanggaran. Total pemakaian bahan bakar PLTD C 50 MW Pesanggaran tahun 2013 adalah sebesar 35.111.298 liter serta produksi listrik sebesar 135.876.258 kWh sedangkan total pemakaian bahan bakar PLTD D 45 MW Pesanggaran tahun 2013 adalah sebesar 8.663.203 liter serta produksi listrik sebesar 33.423.814 kWh.

**3.2 Prakiraan Kebutuhan listrik 2012-2020**

Perhitungan kebutuhan energi listrik Bali tahun 2012-2020 dilakukan mengikuti pola beban dalam penelitian Wirtayasa (2012)[7], Magister Teknik Elektro Universitas Udayana kemudian disesuaikan dengan beban puncak Bali tahun 2012 sampai tahun 2020 yang tertuang dalam RUPTL PT. PLN (PERSERO) 2012-2020. Gambar 1 menunjukkan pola beban Bali tahun 2012-2020. Kebutuhan beban selama 1 hari diprosentasekan setiap 30 menit, sehingga didapatkan kurva beban selama 1 hari di tahun 2012-2020. Beban puncak terjadi pada pukul 19.30 wita meningkat setiap tahun. Beban terendah terjadi pada kisaran pukul 02.30 wita - 04.30 wita. Beban puncak berturut-turut dari tahun 2012-2020 adalah sebesar 674MW, 741MW, 815MW, 897MW, 984MW, 1.077MW, 1.176MW, 1.281MW, 1.390MW.



**Gambar 1. Pola Beban Bali Tahun 2012-2020**

Setelah didapatkan pola beban Bali dari Tahun 2012-2020, maka dapat dihitung kebutuhan energi listrik Bali tahun 2012-2020. Perhitungan dilakukan dengan mengalikan kebutuhan beban setiap setengah jam dengan kebutuhan beban pada saat itu. Tabel 2 menunjukkan prakiraan kebutuhan listrik tahun 2012-2020. Beban puncak tahun 2012 adalah sebesar 674 MW meningkat setiap tahunnya menjadi 1.390 MW pada tahun 2020. Kebutuhan listrik per hari tahun 2012 adalah sebesar 12.625,27 MWh dan pada tahun 2020 sebesar 26.037,27 MWh.

**Tabel 2. Prakiraan Kebutuhan Listrik 2012-2020**

Tahun	Beban Puncak (MW)	Kebutuhan Listrik Perhari (MWh)
2012	674	12.625,27
2013	741	13.880,30
2014	815	15.266,46
2015	897	16.802,47
2016	984	18.432,14
2017	1.077	20.174,20
2018	1.176	22.028,66
2019	1.281	23.995,50
2020	1.390	26.037,27

**3.3 Pemodelan Pembangkit**

Pemodelan emisi karbon Sistem Pembangkitan Bali diawali dengan pemberian simbol pembangkit serta emisi karbon yang dihasilkan. Dimana Pembangkit diberi simbol P dan emisi yang

dihasilkan diberi lambang e. PLTD Pesanggaran 11 dengan symbol  $P_1$  dengan emisi  $e_1$  serta produksi energi listrik kWh<sub>1</sub>. Demikian seterusnya sampai dengan Jawa-Bali Crossing 500 kV dengan simbol  $P_{21}$ , emisi  $e_{21}$  dan produksi listrik kWh<sub>21</sub>. Tabel 3 menunjukkan pemodelan masing-masing pembangkit Bali Tahun 2012-2020.

**Tabel 3. Pemodelan Pembangkit**

Pembangkit	Simbol	Keterangan
PLTD-M Pesanggaran 10	$P_1$	Relokasi April 2014
PLTD-M Pesanggaran 11	$P_2$	Relokasi April 2014
PLTG-M Pesanggaran 1	$P_3$	
PLTG-M Pesanggaran 2	$P_4$	
PLTG-M Pesanggaran 3	$P_5$	
PLTG-M Pesanggaran 4	$P_6$	
PLTG-M Gilimanuk 1	$P_7$	
PLTG-M Pemaron 1	$P_8$	
PLTG-M Pemaron 2	$P_9$	
BOO 30 MW Pesanggaran	$P_{10}$	
BOT 50 MW Pesanggaran	$P_{11}$	Operasi - Juli 2014
BOO 45 MW Pemaron 1-2	$P_{12}$	Operasi - Juli 2014
BOO 20 MW Pemaron 3-4	$P_{13}$	Operasi - Juli 2014
BOO 15 MW Pemaron 5-6	$P_{14}$	Operasi - Juli 2014
BOO 45 MW Pemaron 7-8	$P_{15}$	Operasi - Juli 2014
PLTD C 50 MW Pesanggaran	$P_{16}$	Operasi - Juli 2014
PLTD D 45 MW Pesanggaran	$P_{17}$	Operasi - Juli 2014
Kabel Laut Sirkuit 1-2	$P_{18}$	
Kabel Laut Sirkuit 3-4	$P_{19}$	Operasi Agustus 2014
Celukan Bawang	$P_{20}$	Operasi Agustus 2014
Jawa-Bali 500 KV	$P_{21}$	Operasi Awal 2015

Skenario pola operasi disusun dengan kombinasi pengoperasian pembangkit dimana pembangkit yang ada di Bali dan yang ada di luar Bali dibebankan maksimum secara bergantian dan disesuaikan dengan penambahan pembangkit yang ada. Dalam perhitungan emisi karbon pada masing-masing skenario pola operasi menggunakan beberapa asumsi sebagai berikut: seluruh pembangkit mampu menghasilkan energi listrik dalam batas maksimumnya dan dianggap konstan sampai tahun 2020, pengoperasian pembangkit ideal tanpa terjadi gangguan, rata-rata waktu pemeliharaan sistem pembangkitan Bali dalam 1 tahun adalah 45 hari. Skenario pola operasi yang disusun dibagi menjadi tiga kondisi dan dijabarkan menjadi 6 buah skenario sebagai berikut :

- **Kondisi 1 : Penambahan kabel laut sirkuit 3 dan 4**  
 Skenario 1 : Urutan operasi pembangkit  $P_{11}$ ,  $P_{tambahan}$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{14}$ ,  $P_{16}$ ,  $P_{17}$ ,  $P_{13}$ ,  $P_{12}$ ,  $P_{15}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_7$ ,  $P_6$ ,  $P_5$ ,  $P_8$ ,  $P_9$ ,  $P_4$ ,  $P_3$ ,  $P_{18}$  dan terakhir  $P_{19}$ .  
 Skenario 2 : Urutan operasi pembangkit  $P_{18}$ ,  $P_{19}$ ,  $P_{11}$ ,  $P_{tambahan}$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{14}$ ,  $P_{16}$ ,  $P_{17}$ ,  $P_{13}$ ,  $P_{12}$ ,  $P_{15}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_7$ ,  $P_6$ ,  $P_5$ ,  $P_8$ ,  $P_9$ ,  $P_4$  dan terakhir  $P_3$ .
- **Kondisi 2 : Penambahan PLTU Celukan Bawang**  
 Skenario 3 : Urutan operasi pembangkit  $P_{11}$ ,  $P_{tambahan}$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{14}$ ,  $P_{16}$ ,  $P_{17}$ ,  $P_{13}$ ,  $P_{12}$ ,  $P_{15}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_7$ ,  $P_6$ ,  $P_5$ ,  $P_8$ ,  $P_9$ ,  $P_4$ ,  $P_3$ ,  $P_{18}$ ,  $P_{19}$  dan terakhir  $P_{20}$ .  
 Skenario 4 : Urutan operasi pembangkit  $P_{18}$ ,  $P_{19}$ ,  $P_{20}$ ,  $P_{11}$ ,  $P_{tambahan}$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{14}$ ,  $P_{16}$ ,  $P_{17}$ ,  $P_{13}$ ,  $P_{12}$ ,  $P_{15}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_7$ ,  $P_6$ ,  $P_5$ ,  $P_8$ ,  $P_9$ ,  $P_4$  dan terakhir  $P_3$ .
- **Kondisi 3 : Penambahan Jawa Bali Crossing**

Skenario 5 : Urutan operasi pembangkit  $P_{11}$ ,  $P_{tambahan}$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{14}$ ,  $P_{16}$ ,  $P_{17}$ ,  $P_{13}$ ,  $P_{12}$ ,  $P_{15}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_7$ ,  $P_6$ ,  $P_5$ ,  $P_8$ ,  $P_9$ ,  $P_4$ ,  $P_3$ ,  $P_{18}$ ,  $P_{19}$ ,  $P_{20}$  dan terakhir  $P_{21}$ .

Skenario 6 : Urutan operasi pembangkit  $P_{18}$ ,  $P_{19}$ ,  $P_{20}$ ,  $P_{21}$ ,  $P_{11}$ ,  $P_{tambahan}$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{14}$ ,  $P_{16}$ ,  $P_{17}$ ,  $P_{13}$ ,  $P_{12}$ ,  $P_{15}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_7$ ,  $P_6$ ,  $P_5$ ,  $P_8$ ,  $P_9$ ,  $P_4$  dan terakhir  $P_3$ .

Pembangkit tambahan dimasukkan kedalam skenario karena terdapat rencana PT. Indonesia Power menambah pembangkit dengan kapasitas 50 MW pada awal tahun 2015 dan setiap tahun meningkat 50 MW, sehingga pada tahun 2018 terdapat tambahan pembangkit sebesar 200 MW. Karakteristik  $P_{tambahan}$  ini diasumsikan sama dengan BOT 50 MW Pesanggaran( $P_{11}$ ) sehingga nantinya emisi per kWhnya akan memiliki nilai yang sama.

**3.4 Emisi per kWh Pembangkit**

Emisi per kWh masing-masing pembangkit diperoleh dari besar emisi karbon yang dihasilkan dibagi dengan besar produksi listrik masing-masing pembangkit. Tabel IV menunjukkan emisi per kWh masing-masing pembangkit, besar emisi karbon dihitung dengan persamaan 1 serta produksi listrik sesuai dengan data pada tabel I. Emisi per kWh merupakan emisi karbon yang dihasilkan masing-masing pembangkit dibagi produksi listriknya. Untuk pembangkit  $P_1$  emisi karbon per kWh-nya adalah sebesar 0,800 kg/kWh demikian seterusnya sampai dengan pembangkit  $P_{15}$  sebesar 0,790 kg/kWh. Emisi/kWh pembangkit yang ada di Bali adalah sebesar 0,891 kg/kWh yang didapat dari emisi karbon total  $P_1$ - $P_{15}$  dibagi dengan produksi listrik total  $P_1$ - $P_{15}$ .

**Tabel 4. Emisi Per Kwh Pembangkit**

Pemb	Produksi Listrik (kWh)	Emisi Karbon (kg)	Emisi/kWh (kg/kWh)
$P_1$	42.314.700	33.853.510,38	0,800
$P_2$	44.276.500	36.067.236,29	0,815
$P_3$	34.679.300	48.115.426,94	1,387
$P_4$	34.942.200	47.985.679,96	1,373
$P_5$	197.445.100	228.768.653,90	1,159
$P_6$	123.986.600	139.378.030,07	1,124
$P_7$	601.744.000	606.169.542,65	1,007
$P_9$	31.121.708	36.171.160,07	1,162
$P_{10}$	169.228.092	121.282.246,96	0,717
$P_{11}$	352.119.464	234.941.320,40	0,667
$P_{12}$	310.874.208	242.850.192,04	0,781
$P_{13}$	114.278.052	88.611.260,96	0,775
$P_{14}$	86.064.811	65.349.353,45	0,759
$P_{15}$	188.566.772	149.037.161,38	0,790
<b>TOTAL</b>	<b>2.331.641.505</b>	<b>2.078.580.775,43</b>	<b>0,891</b>

Pada tahun 2013 terdapat penambahan pembangkit sewa  $P_{16}$  dan  $P_{17}$ . Berdasarkan hasil perhitungan, emisi karbon per kWh dari pembangkit  $P_{16}$  adalah sebesar 0,769 kg/kWh serta pembangkit  $P_{17}$  sebesar 0,771 kg/kWh.

**3.5 Emisi Karbon Sistem Pembangkitan Bali dengan Pola Operasi Eksisting Tahun 2013-2020**

Perhitungan emisi karbon sistem pembangkitan Bali dengan pola operasi eksisting dihitung dengan

mengalikan emisi karbon per kWh masing-masing pembangkit dengan prakiraan produksi listrik masing-masing pembangkit tahun 2013-2020. Total produksi listrik sistem pembangkitan Bali dipenuhi oleh suplai dari luar Bali yaitu pembangkit P<sub>18</sub> (kabel laut sirkit 1 dan 2) sebesar 23,838% dan sisanya adalah dari pembangkit yang ada di Bali sebesar 76,162%.

Emisi karbon per kWh untuk pembangkit Bali adalah sebesar 0,810 kg/kWh setelah penambahan P<sub>16</sub> dan P<sub>17</sub>, sedangkan untuk pembangkit luar Bali termasuk kabel laut sirkit 3 dan 4 (P<sub>19</sub>) dan Jawa Bali Crossing (P<sub>21</sub>) menggunakan *average grid emission factor* untuk Jawa Bali yang terdapat dalam RUPTL PT. PLN (Persero) 2011-2020 sebesar 0,778 kg/kWh [4]. Sedangkan untuk PLTU Celukan Bawang emisi karbon per kWh diasumsikan sebesar 1,140 kg/kWh.

### 3.6 Emisi Karbon Pola Operasi Skenario 1

Emisi karbon per hari didapatkan dengan mengalikan kWh yang dibangkitkan dengan emisi per kWh masing-masing pembangkit yang beroperasi disesuaikan urutan pada skenario yang telah disusun serta kebutuhan beban. Emisi karbon selama satu tahun didapat dengan mengalikan emisi karbon perhari dengan 365 hari dikurangi asumsi waktu pemeliharaan rata-rata sistem pembangkitan Bali sebesar 45 hari. Tabel 5 menunjukkan emisi karbon per tahun dari pembangkit Bali dengan pola operasi skenario 1. Emisi karbon yang dihasilkan oleh skenario 1 sebesar 4.018.204 Ton pada tahun 2013 terus meningkat setiap tahun menjadi 6.373.047 Ton pada tahun 2020.

**Tabel 5. Emisi Karbon Skenario 1**

Tahun	Emisi Karbon (Kg)	Emisi Karbon (Ton)
2013	4.018.204.251	4.018.204
2014	4.595.088.948	4.595.089
2015	4.953.744.389	4.953.744
2016	5.316.927.837	5.316.928
2017	5.701.001.873	5.701.002
2018	6.127.238.791	6.127.239
2019	6.373.046.957	6.373.047
2020	6.373.046.957	6.373.047

### 3.7 Emisi Karbon Pola Operasi Skenario 2

Pada skenario 2 ini pengoperasian pembangkit dimulai dengan pembebanan maksimum pada Kabel laut sirkit 1,2,3 dan 4, kemudian dilanjutkan dengan pembebanan pembangkit dengan urutan pembangkit yang memiliki emisi karbon per kWh terendah sampai tertinggi disesuaikan dengan kebutuhan listrik perhari setiap tahunnya.

Tabel 6 menunjukkan emisi karbon per tahun dari pembangkit Bali dengan pola operasi skenario 2. Emisi karbon yang dihasilkan oleh skenario 2 sebesar 3.515.254 Ton pada tahun 2013 terus meningkat setiap tahun menjadi 6.373.047 Ton pada tahun 2020. Dengan pembebanan maksimum pada kabel laut sirkit 1,2,3 dan 4, emisi karbon yang dihasilkan lebih rendah daripada skenario 1.

**Tabel 6. Emisi Karbon Skenario 2**

Tahun	Emisi Karbon (Kg)	Emisi Karbon (Ton)
2013	3.515.253.876	3.515.254
2014	4.016.565.843	4.016.566
2015	4.573.810.969	4.573.811
2016	4.989.826.508	4.989.827
2017	5.415.960.084	5.415.960
2018	5.947.261.007	5.947.261
2019	6.373.046.957	6.373.047
2020	6.373.046.957	6.373.047

### 3.8 Emisi Karbon Pola Operasi Skenario 3

Emisi Karbon yang dihasilkan oleh sistem pembangkit Bali dengan pembebanan maksimum pada pembangkit P<sub>1</sub>-P<sub>17</sub> memiliki hasil yang sama dengan Skenario 1 dari tahun 2013-2018, karena kebutuhan listrik per hari bisa dipenuhi oleh pembangkit P<sub>1</sub>-P<sub>17</sub> dan pembangkit P<sub>18</sub>-P<sub>19</sub>. Untuk tahun 2019-2020 memiliki hasil yang berbeda karena PLTU Celukan Bawang (P<sub>20</sub>) baru dioperasikan pada sistem. Tabel 7 menunjukkan emisi karbon per tahun dari pembangkit Bali dengan pola operasi skenario 3. Emisi karbon yang dihasilkan oleh skenario 3 sebesar 4.018.204 Ton pada tahun 2013 terus meningkat setiap tahun menjadi 7.475.206 Ton pada tahun 2020.

**Tabel 7. Emisi Karbon Skenario 3 Tahun 2013-2020**

Tahun	Emisi Karbon (Kg)	Emisi Karbon (Ton)
2013	4.018.204.251	4.018.204
2014	4.595.088.948	4.595.089
2015	4.953.744.389	4.953.744
2016	5.316.927.837	5.316.928
2017	5.701.001.873	5.701.002
2018	6.127.238.791	6.127.239
2019	6.730.368.557	6.730.369
2020	7.475.206.253	7.475.206

### 3.9 Emisi Karbon Pola Operasi Skenario 4

Kabel laut sirkit 3-4 (P<sub>19</sub>) serta PLTU IPP Celukan Bawang (P<sub>20</sub>) beroperasi mulai Agustus 2014. Sehingga untuk Tahun 2013-Juli 2014 besar emisi karbon dari pengoperasian pembangkit sama dengan pembahasan E(skenario 2). Emisi karbon selama satu tahun didapat dengan mengalikan emisi karbon perhari dengan 365 hari dikurangi asumsi waktu pemeliharaan rata-rata sistem pembangkitan Bali sebesar 45 hari. Tabel 8 menunjukkan emisi karbon per tahun dari pembangkit Bali dengan pola operasi skenario 4. Emisi karbon yang dihasilkan oleh skenario 4 sebesar 3.515.254 Ton pada tahun 2013 terus meningkat setiap tahun menjadi 7.452.686 Ton pada tahun 2020.

**Tabel 8. Emisi Karbon Skenario 4 Tahun 2013-2020**

Tahun	Emisi Karbon (Kg)	Emisi Karbon (Ton)
2013	3.515.253.876	3.515.254
2014	4.155.554.453	4.155.554
2015	5.073.080.055	5.073.080
2016	5.638.515.118	5.638.515
2017	6.010.463.318	6.010.463
2018	6.406.410.103	6.406.410
2019	6.826.351.206	6.826.351
2020	7.452.686.261	7.452.686

### 3.10 Emisi Karbon Pola Operasi Skenario 5

Emisi karbon yang dihasilkan tahun 2013-2018 oleh pola operasi skenario 5 adalah menjadi sama dengan pola operasi skenario 3 dimana kebutuhan listrik Bali dapat dipenuhi tanpa pengoperasian *Bali Jawa Crossing* maupun PLTU Celukan Bawang. Pola operasi skenario 5 memiliki emisi karbon yang lebih rendah daripada skenario 3 untuk tahun 2019-2020. Hal ini menunjukkan *Jawa Bali Crossing* dengan daya mampu yang besar akan mampu menurunkan emisi Sistem Pembangkitan Bali. Tabel 9 menunjukkan emisi karbon per tahun dari pembangkit Bali dengan pola operasi skenario 5. Emisi karbon yang dihasilkan oleh skenario 5 sebesar 4.018.204 Ton pada tahun 2013 terus meningkat setiap tahun menjadi 7.125.222 Ton pada tahun 2020.

**Tabel 9. Emisi Karbon Skenario 5 Tahun 2013-2020**

Tahun	Emisi Karbon (Kg)	Emisi Karbon (Ton)
2013	4.018.204.251	4.018.204
2014	4.595.088.948	4.595.089
2015	4.953.744.389	4.953.744
2016	5.316.927.837	5.316.928
2017	5.701.001.873	5.701.002
2018	6.127.238.791	6.127.239
2019	6.616.903.277	6.616.903
2020	7.125.222.336	7.125.222

### 3.11 Emisi Karbon Pola Operasi Skenario 6

Pengoperasian *Jawa Bali Crossing* direncanakan mulai tahun 2015, sehingga untuk tahun 2013 - Juli 2014 besar emisi karbon dari pengoperasian pembangkit sama dengan pembahasan E(Skenario 2). Untuk Bulan Agustus-Desember 2014 kebutuhan listrik dipenuhi dengan pengoperasian kabel laut sirkit 1,2,3 dan 4 serta PLTU IPP Celukan Bawang. *Jawa Bali Crossing* dimasukkan tahun 2015 untuk menambah suplai energi listrik. Emisi karbon selama satu tahun didapat dengan mengalikan emisi karbon perhari dengan 365 hari dikurangi asumsi waktu pemeliharaan rata-rata sistem pembangkitan Bali sebesar 45 hari. Tabel 10 menunjukkan emisi karbon per tahun dari pembangkit Bali dengan pola operasi skenario 6. Emisi karbon yang dihasilkan oleh skenario 5 sebesar 3.515.254 Ton pada tahun 2013 terus meningkat setiap tahun menjadi 7.051.855 Ton pada tahun 2020.

**Tabel 10. Emisi Karbon Skenario 6 Tahun 2013-2020**

Tahun	Emisi Karbon (Kg)	Emisi Karbon (Ton)
2013	3.515.253.876	3.515.254
2014	4.155.554.453	4.155.554
2015	4.183.142.794	4.183.143
2016	4.588.865.574	4.588.866
2017	5.022.568.832	5.022.569
2018	5.589.514.368	5.589.514
2019	6.307.017.600	6.307.018
2020	7.051.855.296	7.051.855

### 3.12 Pajak Karbon Sistem Pembangkitan Bali

Berdasarkan *Economic and Fiscal Policy Strategies for Climate Change Mitigation in Indonesia* yang dirilis Kementerian Keuangan, Pemerintah Indonesia berencana untuk memberlakukan pajak karbon pada tahun 2014. Pajak karbon sejumlah Rp 80.000 setiap ton emisi CO<sub>2</sub> akan diterapkan dan dijadwalkan naik 5% setiap tahun. Dengan acuan nilai pajak karbon tersebut dapat dihitung pajak Karbon yang harus dikenakan untuk sistem pembangkitan Bali yang disesuaikan dengan skenario pola operasi yang telah ditentukan dalam pembahasan penelitian ini.

Pajak karbon yang dihasilkan masing masing skenario pola operasi berbanding lurus dengan emisi karbon yang dihasilkan masing masing skenario pola operasi. Pajak karbon tahun 2013 tidak dilakukan perhitungan karena kebijakan pengenaan pajak karbon adalah pada tahun 2014. Tabel 11 menunjukkan pajak karbon untuk masing-masing skenario.

Dari tabel 7 dapat dilihat untuk tahun 2014 pajak karbon terendah diperoleh dari pola operasi eksisting sebesar Rp. 56,28 per kWh. setelah masuknya *Jawa Bali Crossing* tahun 2015, pajak karbon per kWh terendah dari tahun 2015 sampai tahun 2020 didapat dengan pola operasi skenario 6. Seperti pembahasan pajak karbon total diatas, pajak karbon yang lebih rendah akan diperoleh dengan maksimum pengoperasian pembangkit yang ada di luar Bali.

Dari pengoperasian pembangkit dengan pola operasi 1-6, kebutuhan energi listrik Bali hanya dapat dipenuhi oleh pola operasi skenario 3-6 sedangkan untuk pola operasi 1 dan 2 tidak dapat memenuhi kebutuhan listrik tahun 2019-2020. Skenario terbaik yang menghasilkan emisi karbon terendah adalah pola operasi skenario 6. Emisi karbon yang dihasilkan dengan pengoperasian maksimum pada pembangkit Pesanggaran, Gilimanuk, Pemaron dan Pembangkit Sewa memiliki nilai lebih tinggi daripada pengoperasian maksimum pada Kabel laut dan *Jawa Bali Crossing* 500kV.

Pada RUPTL.PT. PLN (Persero) 2011-2020 proyeksi emisi karbon pembangkit seluruh Indonesia akan meningkat dari 141 juta ton pada 2011 menjadi 276 juta ton pada tahun 2020. Sedangkan untuk Sistem *Jawa Bali* emisi karbon naik dari 110 juta ton pada 2011 menjadi 205 juta ton pada 2020. Emisi karbon yang dihasilkan Sistem pembangkitan Bali

dengan pola operasi skenario 6 pada tahun 2020 adalah sebesar 7.051.855 ton, jika dipresentasikan emisi karbon sistem pembangkit Bali adalah 3,44% dari seluruh emisi Sistem Jawa Bali.

Pembangkit Suralaya yang juga terkoneksi dengan Sistem Jawa Bali menurut penelitian yang dilakukan oleh CGD (*Center for Global Development*) merupakan penghasil emisi karbon urutan 11 terbesar di dunia dengan emisi yang dihasilkan sebesar 27.200.000 ton [5].

PLTU Suralaya berlokasi di Propinsi Banten. Total kapasitas PLTU Suralaya adalah 3.400 MW dengan konsumsi batubara sekitar 12 juta ton per tahun, dan memproduksi listrik rata-rata sebesar 25 miliar kWh per tahun [8]. Dengan produksi Listrik dan emisi karbon yang dihasilkan oleh PLTU Suralaya tersebut emisi karbon per kWh-nya adalah 1,088 kg/kWh. Jika dibandingkan dengan emisi karbon sistem pembangkitan Bali dengan pola operasi skenario 6, jika semua pembangkit bekerja

..

Tabel 11. Pajak Karbon Tahun 2014-2020

Tahun	Pajak Karbon (Milyar Rp)						
	Eksisting	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3	Skenario 4	Skenario 5	Skenario 6
2014	313,58	367,61	321,33	367,61	332,44	367,61	332,44
2015	362,39	416,11	384,20	416,11	426,14	416,11	351,38
2016	417,42	468,95	440,10	468,95	497,32	468,95	404,74
2017	479,71	527,97	501,57	527,97	556,63	527,97	465,14
2018	550,00	595,82	578,31	595,82	622,96	595,82	543,53
2019	629,06	650,70	650,70	687,19	696,99	675,60	643,96
2020	716,72	683,24	683,24	801,40	798,98	763,88	756,01

Tabel 12. Pajak Karbon/ Kwh Tahun 2014-2020

Tahun	Pajak karbon per kWh (Rp.)						
	Eksisting	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3	Skenario 4	Skenario 5	Skenario 6
2014	56,28	65,97	57,67	65,97	59,66	65,97	59,66
2015	59,09	67,85	62,65	67,85	69,48	67,85	57,29
2016	62,04	69,70	65,42	69,70	73,92	69,70	60,16
2017	65,15	71,70	68,12	71,70	75,59	71,70	63,17
2018	68,40	74,10	71,93	74,10	77,48	74,10	67,60
2019	74,88	77,46	77,46	78,46	79,58	77,14	73,53
2020	85,31	81,33	81,33	84,33	84,07	80,38	79,55

..

#### 4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan emisi karbon sistem pembangkitan Bali menunjukkan emisi karbon terendah tahun 2013-2020 dihasilkan oleh pola operasi skenario 6. Pajak karbon per kWh terendah dihasilkan oleh pola operasi skenario 6 tahun 2015-2020 setelah masuknya *Jawa Bali Crossing* ke dalam sistem. Emisi karbon yang dihasilkan dengan pengoperasian maksimum pada pembangkit Pesanggaran, Gilimanuk, Pemaron dan Pembangkit Sewa memiliki nilai lebih tinggi daripada pengoperasian maksimum pada Kabel laut dan *Jawa Bali Crossing* 500kV. Oleh karena itu untuk mengurangi pajak karbon maka pengoperasian

emisi per kWh sistem pembangkitan Bali adalah 0,916 kg/ kWh, emisi yang dihasilkan oleh pola operasi skenario 4 lebih rendah daripada PLTU Suralaya.

Berdasarkan proposal EPA turbin bertenaga gas alam ukuran besar harus memenuhi batas polusi 453,6 kg CO<sub>2</sub> per MWh. Sementara turbin gas alam kecil harus memenuhi batas sekitar 500 kg CO<sub>2</sub> per MWh. Pembangkit listrik tenaga batu bara baru juga harus memenuhi batas polusi 500 kg CO<sub>2</sub> per MWh [9].

Sistem pembangkitan Bali memiliki emisi karbon per kWh lebih tinggi hampir dua kali lipat dari standar pembatasan polusi karbon bagi pembangkit listrik baru yang diusulkan EPA, dengan batas polusi pembangkit listrik tenaga batubara sebesar 500 kg/ MWh atau 0,5 kg/kWh. PLTU Suralaya juga memiliki nilai emisi karbon per kWh dua kali lipat lebih tinggi dari standar tersebut.

dilakukan dengan memaksimalkan pasokan dari luar Bali berupa kabel laut dan *Jawa Bali Crossing*.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Astra, I.M, 2010. Energi dan Dampaknya Terhadap Lingkungan. Jurnal Meteorologi dan Geofisika Vol. 11 No. 2 Tahun 2010 : 127-135.
- [2] Finahari, I.N. dkk. 2010. Emisi Gas CO<sub>2</sub> pada Unit Bisnis Pembangkitan (UBP) Semarang. *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir III Pusat Pengembangan Energi Nuklir Badan Tenaga Nuklir Nasional*. 2010.
- [3] *Economic and Fiscal Policy Strategies for Climate Change Mitigation in Indonesia*. Available from: URL :

- 
- <http://www.fiskal.depkeu.go.id/webbkf/siaranpers/siaranpdf%5CGreen%20Paper%20Final.pdf>  
Diunduh tanggal 12 November 2012.
- [4] PT. PLN (Persero). 2011. Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. PLN (Persero) 2011-2020. Jakarta : PT. PLN (Persero).
- [5] Negara Penghasil CO<sub>2</sub> Terbesar. Available from:  
URL:[http://www.bapelkescikarang.or.id/bapelkescikarang/index.php?option=com\\_content&view=article&id=599:10-negara-penghasil-emisi-co2-terbesar&catid=39:kesehatan&Itemid=15](http://www.bapelkescikarang.or.id/bapelkescikarang/index.php?option=com_content&view=article&id=599:10-negara-penghasil-emisi-co2-terbesar&catid=39:kesehatan&Itemid=15).  
Diunduh tanggal 19 juni 2014.
- [6] Capture and Transportation Working Group of the DOE Regional Carbon Sequestration Partnerships, 2010. *CO<sub>2</sub> Stationary Source Emission Estimation Methodologies Summary*. U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory Carbon Storage Program.
- [7] Wirtayasa, IK. 2012. “Analisis Ketersediaan Daya Listrik Pulau Bali Dengan Beroperasinya SUTET 500 KV Jawa-Bali” (Tesis). Denpasar :Univesitas Udayana
- [8] Ringkasan Eksklusif Kajian Internalisasi Biaya Eksternal Pengembangan Energi. Available from: URL: [http://www.esdm.go.id/batubara/doc\\_download/1061-ringkasan-eksekutif-kajian-internalisasi-biaya-eksternal-pengembangan-energi.html](http://www.esdm.go.id/batubara/doc_download/1061-ringkasan-eksekutif-kajian-internalisasi-biaya-eksternal-pengembangan-energi.html) Diunduh tanggal 20 Juni 2014.
- [9] EPA Usulkan Standar Polusi Pembangkit Listrik. Available from: URL: <http://www.batamtoday.com/berita33730-EPA-Usulkan-Standar-Polusi-Pembangkit-Listrik.html> Diunduh tanggal 20 Juni 2014.