



## JURNAL SEGARA

<http://ejournal-balitbang.kkp.go.id/index.php/segara>

ISSN : 1907-0659

e-ISSN : 2461-1166

Nomor Akreditasi: 766/AU3/P2MI-LIPI/10/2016

### PREDIKSI JALUR (*PATHWAY*) LOGAM MERKURI DARI BATUBARA KEGIATAN PLTU DI TELUK PALABUANRATU DENGAN PENDEKATAN SISTEM DINAMIS

### *PATHWAY PREDICTION OF MERCURY METAL FROM COAL PLTU ACTIVITIES IN PALABUANRATU BAY WITH A DYNAMIC SYSTEM APPROACH*

Devi Dwiyanti Suryono<sup>1)</sup> & Endang Sri Pujilestari<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Pusat Riset Kelautan, Badan Riset dan Sumber Daya Manusia Kelautan dan Perikanan  
Kementerian Kelautan dan Perikanan

<sup>2)</sup>Program Studi Ilmu Lingkungan, Sekolah Ilmu Lingkungan Universitas Indonesia

Diterima: 1 Maret 2018; Diterima Setelah Perbaikan: 9 Desember 2019; Disetujui Terbit: 15 Desember 2019

#### ABSTRAK

Kegiatan PLTU berpotensi menghasilkan logam merkuri (Hg) yang bersumber dari batubara sebagai bahan bakunya. Merkuri memiliki sifat yang persisten dan mampu mengalami bioakumulasi dan biomagnifikasi dalam rantai makanan. Kegiatan PLTU di Palabuanratu akan beroperasi selama 20 tahun dan hal ini menimbulkan kekhawatiran merkuri yang dihasilkan akan mencemari air laut dan masuk dalam rantai makanan di perairan Teluk Palabuanratu. Tujuan pemodelan system dinamis ini adalah melakukan prediksi dan menganalisis faktor dominan dari peningkatan merkuri air laut selama masa beroperasi PLTU serta terjadinya biomagnifikasi dalam rantai makanan. Gambaran mengenai jejak merkuri dari sumber batubara PLTU di udara, air dan rantai makanan, kaitannya dengan peningkatan konsentrasi merkuri di perairan menggunakan metode *System dynamics*. Hasil pemodelan menunjukkan peningkatan merkuri akan melebihi baku mutu Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 51 Tahun 2004 untuk biota laut pada 2027. Terjadinya biomagnifikasi pada ikan plankton feeder, ikan top predator dan pada manusia mulai tahun 2017 dimana konsentrasi metil merkuri (MeHg) pada manusia sebagai konsumen tertinggi lebih besar (1,22) dibanding pada ikan top predator (0,408) dan ikan plankton feeder (0,0738), namun masih di bawah level ketiganya level toleransi MeHg menurut UNEP. Faktor yang dominan meningkatkan merkuri anorganik dalam air laut adalaheceran batubara.

**Kata kunci :** Prediksi, Merkuri, Batubara, Sistem Dinamis, Biomagnifikasi.

#### ABSTRACT

*The activities of Electric Steam Power Plant (PLTU) potentially produce mercury (Hg) from coal as its raw material. Mercury is persistent and capable of bioaccumulation and biomagnification in the food chain. PLTU activities in Palabuanratu will operate for 20 years and this raises concerns that mercury generated will contaminate seawater and enter the food chain in the waters of Palabuanratu Bay. The purpose of this model is to predict and analyze the dominant factors of increased sea water mercury during the operation of the steam power plant and the occurrence of biomagnification in the food chain. The description of mercury pathway from coal sources of steam power plants in the air, water and food chains, is associated with increased mercury concentrations in waters using the System dynamics method. The result of modeling shows that mercury increase will exceed the quality standard of Decree of the Minister of Environment No. 51 Year 2004 for marine biota in Year 2027. Biomagnification occurred to plankton feeder fish, predator fish and to humans starting in 2017 where concentration of methyl mercury (MeHg) in human being as the highest consumer is bigger than in predator fish and Plankton feeder, but still below the level of the three levels of tolerance MeHg according to UNEP. The dominant factor of increasing inorganic mercury in seawater is coal spills.*

**Keywords:** Prediction, Mercury, Coal, System Dynamics, Biomagnification.

Corresponding author:

Jl. Pasir Putih I Ancol Timur, Jakarta Utara 14430. Email: devibasworo@yahoo.com

Copyright © 2018 Jurnal Segara

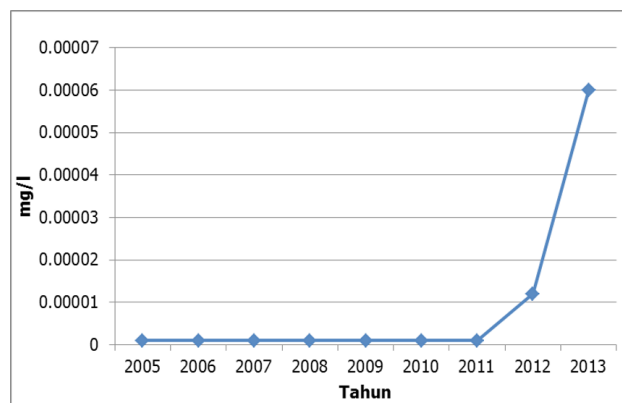
DOI: <http://dx.doi.org/10.15578/segara.v15i3.6708>

## PENDAHULUAN

Teluk Palabuhanratu merupakan daerah penangkapan ikan (*fishing ground*) dan sebagian besar mata-pencaharian di pesisir adalah nelayan. Potensi perikanan yang cukup besar di wilayah pantai diantaranya terdapat ikan layur, sarden, tongkol, pari, dan teri. Selain itu di lepas pantai terdapat potensi perikanan ikan tuna, tenggiri, dan manyung. Sedangkan di sekitar muara sungai terdapat ikan sidat, bandeng dan gabus (PLN, 2006). Berdasarkan hasil pemantauan lingkungan pada 2012 ditemukan adanya peningkatan konsentrasi merkuri (Hg) pada air laut yang letaknya sekitar 1 km di depan muara Sungai Cimandiri yang merupakan wilayah Pelabuhan Khusus milik PLTU Palabuhanratu yang jaraknya sekitar 4 km dari tempat pelelangan ikan. Peningkatan ini terus berlangsung hingga pemantauan tahun 2013. Grafik peningkatan merkuri (Hg) disajikan pada Gambar 1.

Merkuri (Hg) adalah logam berat yang bersifat toksik yang menyerang syaraf dan otak serta sulit untuk didegradasi maupun dihancurkan dan dapat masuk ke dalam tubuh manusia lewat makanan, air minum, atau melalui udara (Martaningtyas, 2004). Kemampuan afinitas terhadap lipid dalam tubuh organisme mengakibatkan Hg mengalami bioakumulasi dan biomagnifikasi dibandingkan bentuk logam berat lainnya (Ravichandran, 2004). Merkuri telah mulai dimanfaatkan sejak abad ke 18 untuk pembuatan "*felt hats*". Amalagam emas adalah campuran dengan merkuri banyak digunakan dalam penyepuhan, sehingga banyak menyebabkan kecelakaan bagi para pekerja. Hingga saat ini merkuri masih digunakan secara luas dalam pertambangan rakyat di seluruh Indonesia untuk memisahkan atau memurnikan emas yang baru ditambang dari bahan-bahan lain yang ikut bersamanya saat digali. Di Indonesia, pertambangan berskala kecil atau pertambangan emas tanpa izin (PETI) sampai saat ini masih terus bertambah karena harga emas semakin melonjak tinggi dibanding pada tahun 1980-an. Diperkirakan saat ini terdapat sekitar 250.000 penambang tanpa izin dan sekitar 1 juta orang pekerja lainnya terlibat dalam kegiatan ini. Menurut perkiraan secara kolektif para penambang tanpa izin ini bisa memproduksi sekitar 60 ton emas setiap tahun, dibandingkan dengan jumlah ekspor emas Indonesia secara resmi berjumlah 100 ton per tahun (Wihardandi, 2013). Simson *et al.* (2005) melaporkan bahwa air laut di atas pertambangan emas Ratatotok, Minahasa Selatan mengandung peningkatan kadar As dan Hg (Sembel, 2015).

Peningkatan konsentrasi Hg di perairan dapat disebabkan oleh buangan industri (*industrial wastes*). Merkuri dapat berada dalam bentuk senyawa anorganik dan senyawa organik, sedangkan di alam logam Hg terbentuk melalui proses pelapukan batuan dan



Gambar 1. Konsentrasi Merkuri (Hg) di Laut Hasil Pemantauan Tahun 2005-2013.  
(Sumber: PLTU, 2013)

peletusan gunung berapi, namun pencemaran Hg yang disebabkan oleh kegiatan alam peningkatannya tidak signifikan (Herman, 2006). Kegiatan yang berada di sekitar muara Sungai Cimandiri yang berpotensi menghasilkan Hg adalah PLTU lengkap dengan pelabuhan khusus batubara dan penambang pasir, penambangan emas rakyat yang berlokasi di Cisolak (sekitar 20 km arah Barat Laut dari muara Sungai Cimandiri) dan berlokasi di Cigaru (sekitar 12 km arah Barat Daya muara Sungai Cimandiri). Kedua penambangan emas ini sudah berumur 20 tahun kemudian pada 2012 penambangan di Cisolak telah ditutup.

Berdasarkan laporan EPA (2000) diketahui bahwa batubara memiliki kadar merkuri sekitar 50% dari emisi pembakaran batubara di PLTU meskipun persentase ini tergantung pada sumber batubara. Hal ini menimbulkan dugaan batubara sebagai sumber peningkatan Hg di sekitar PLTU Palabuhanratu. Pengangkutan batubara PLTU Palabuhanratu dilakukan pertama kali pada Tahun 2012 kemudian ujicoba emisi pertama kali Tahun 2013. Kecenderungan peningkatan Merkuri dan hubungannya dengan kegiatan sekitar selengkapnya disajikan dalam Tabel 1.

Berdasarkan perhitungan desain PLTU Palabuhanratu penggunaan batubara untuk pembangkit 1100 MW sekitar 4.100.000 ton/tahun (PLN, 2006). Batubara merupakan bahan bakar dari PLTU Palabuhanratu yang didatangkan dari Kalimantan dengan kapal tongkang kemudian memasuki wilayah pelabuhan khusus batubara selanjutnya dilakukan proses mengambil batubara dari tongkang (*ship unloader*) dengan kapasitas 2 x 1250 ton/jam untuk dialirkan melalui belt conveyor menuju coal yard dengan kapasitas 186.000 ton. Proses *ship unloader* berpotensi menimbulkan ceceran batubara yang umumnya terjadi pada saat angin kencang >10 knots yang menerbangkan butiran batubara kemudian jatuh

Tabel 1. Konsentrasi Merkuri (Hg) di Laut dan kegiatan sekitar

Tahun	Konsentrasi (mg/l)	Keterangan	
		Kegiatan di sekitar Lokasi	Kegiatan Industri lain
2005	$1 \times 10^{-5}$	Penambang pasir pantai	Penambang emas Rakyat di Cisolok dan Cigaru telah berlangsung 20 tahun
2006	$1 \times 10^{-5}$		
2007	$1 \times 10^{-5}$		
2008	$1 \times 10^{-5}$	Konstruksi PLTU	Penambangan di Cigaru dimiliki perusahaan
2009	$1 \times 10^{-5}$		
2010	$1 \times 10^{-5}$	Konstruksi Pelsus batubara	Penambangan Cisolok ditutup Hanya ada penambangan emas di Cigaru
2011	$1 \times 10^{-5}$		
2012	$1,2 \times 10^{-5}$		
2013	$6 \times 10^{-5}$	Uji coba pembakaran batubara	

Sumber: PLTU, 2013

ke lingkungan (PLN, 2006).

Sebelum digunakan sebagai bahan bakar batubara dihancurkan dalam *coal crusher* kemudian dibawa ke ruang bakar (*boiler*), Hasil pembakaran batubara menghasilkan abu yang tertangkap oleh ESP dengan efisiensi 99% kemudian disimpan di *ash yard*. Namun, sekitar 1% partikulat lolos kemudian didispersikan melalui chimney setinggi 215 m. Chimney merupakan sistem pembuangan *flue gas* sisa pembakaran batubara ke lingkungan atmosfer sekitar (PLN, 2006). Dalam emisi ini merkuri terlepas ke udara bersamaan dengan polutan lainnya. Merkuri (Hg) yang teremisikan ke udara dapat dalam bentuk uap Merkuri ( $Hg^0$ ), Oksida Merkuri dan Partikulat (USEPA, 1995). Uap Hg dapat teroksidasi dan tersimpan dalam curah hujan dan jatuh ke laut. Penguapan air laut atau proses evaporasi juga dapat membawa Hg anorganik dari laut sekitar 10% dari Hg perairan kembali ke udara yang disebut evasion merkuri (UNEP, 2013).

Merkuri anorganik yang jatuh ke air akan mengalami proses metilasi. Metilasi adalah Hg yang berada dalam bentuk bebas oleh bakteri akan diubah menjadi organomercuri yang merupakan hasil dari metabolisme bakteri. Merkuri (Hg) organik hasil metilasi sekitar 75% (Driscoll *et al.*, 2013). Organomercuri yang masuk ke dalam rantai makanan adalah metil merkuri (MeHg) (Budiono, 2003), yaitu bentuk senyawa organik dengan daya racun tinggi dan sukar terurai sedangkan bentuk yang lain dapat terdekomposisi kembali menjadi merkuri anorganik (Booth & Zeller, 2005) atau demetilasi sebesar 48,4% (Driscoll *et al.*, 2013).

Proses bioakumulasi dari jalur air dan partikulat serta biomagnifikasi metil merkuri pada rantai makanan akuatik (Suseno, 2011). Merkuri yang masuk ke rantai makanan berawal dari plankton dengan tingkat absorpsi sebesar 26,67% (UNEP, 2013). Kemudian

plankton ini akan dimakan ikan plankton feeder atau ikan non predator. Salah satu ikan non predator dan plankton feeder adalah ikan Mackerel (tongkol). Banyaknya MeHg yang ada dalam tubuh ikan bergantung pada banyaknya plankton yang dimakan dan berat tubuh ikan itu sendiri. Pada proses ekskresi yaitu pada urine ikan dikeluarkan pula MeHg sebesar 6,1% (Bacaksızlar & Önsel, 2013), hal ini akan mempengaruhi tingkat konsentrasi MeHg air. Level MeHg ditoleransi pada ikan plankton feeder adalah 0,5 mg MeHg /kg.

Proses makan memakan di laut ikan plankton feeder akan dimakan oleh ikan top predator dalam hal ini ikan tuna yang seringkali memangsa ikan tongkol. Terjadinya biomagnifikasi MeHg pada ikan tuna bergantung pada banyaknya ikan tongkol yang dimakan dan bobot tubuh ikan tuna, tingkat ekskresi pada ikan tuna sebesar 5,6% (Bacaksızlar & Önsel, 2013). Level meHg yang dapat ditoleransi pada ikan predator adalah 1 mg MeHg/kg (UNEP, 2008).

Perjalanan MeHg tidak berhenti sampai di ikan tuna karena pada tubuh manusia juga dapat ditemukan Metil Merkuri (MeHg) karena rantai makanan ini pada akhirnya akan sampai ke manusia. Jalur utama paparan MeHg pada manusia salah satunya adalah melalui konsumsi ikan (Barkey *et al.*, 2005). Semakin banyak mengkonsumsi ikan yang mengandung MeHg maka semakin menumpuk kandungan meHg pada manusia. Tingkat konsumsi ikan di Jawa Barat sendiri menurut data BPS, 2013 sebesar 23 kg/kapita. Seperti halnya pada ikan, berat tubuh manusia juga menentukan kadar MeHg yang tersimpan dalam tubuh. Level toleransi MeHg pada manusia adalah 1,6 mg/kg berat badan (UNEP, 2008).

Beberapa penelitian tentang dampak merkuri baik pada perairan, sedimen maupun biota telah banyak dilakukan. Penelitian keberadaan merkuri

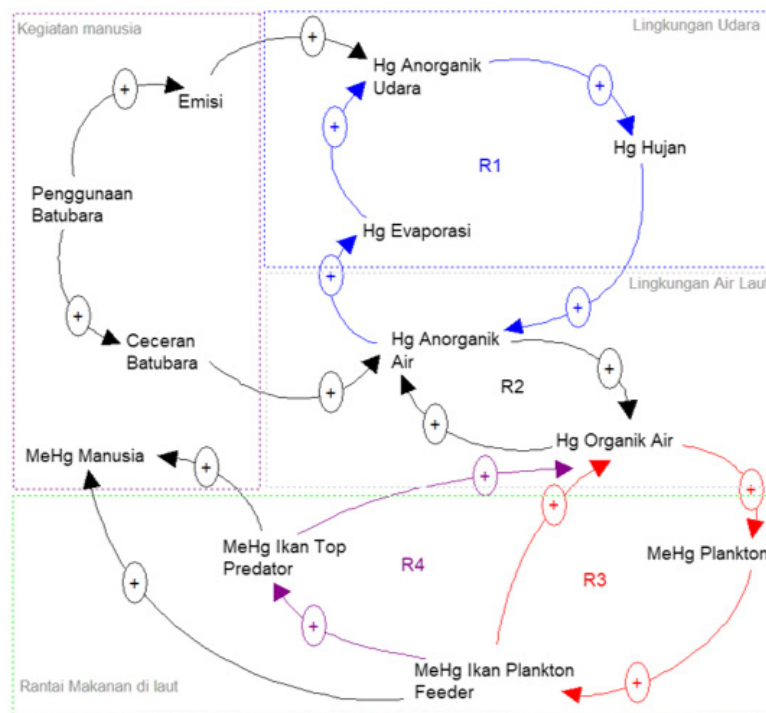
pada ekosistem dan biota berdasarkan penelitian Lasut *et al.* (2005) menyimpulkan bahwa total merkuri dan metal merkuri terakumulasi dalam berbagai kelompok biota laut di Buyat yang merupakan tempat penempatan tailing dari pertambangan emas PT. Newmont Minahasa Raya di Minahasa Selatan, Provinsi Sulawesi Utara bervariasi dari konsentrasi yang relatif rendah pada koral lembut (*Soft coral*), rumput laut (*Seagrass*) dan gulma laut (*Sea weeds*) tetapi relatif tinggi pada ikan. Dalam penelitian yang sama ditunjukkan bahwa konsentrasi total merkuri pada ikan lebih <0,5 mg/kg (Sembel, 2015). Penelitian yang dilakukan oleh Husodo *et al.* (2005) menunjukkan bahwa adanya pencemaran merkuri pada sedimen sungai dan pada biota perairan akibat penambangan emas Kulonprogo. Demikian pula penelitian yang dilakukan oleh Mahmud (2012) menunjukkan bahwa merkuri sudah mencemari hewan aquatik yang hidup di Sungai Tulabolo dan Sungai Bone. Udang di muara Tulabolo memiliki akumulasi terbesar yaitu 0,445 mg/kg. Hasil analisis menunjukkan bahwa konsentrasi merkuri berkisar 0,0223 - 0,4515 mg/kg. Hasil ini sudah berada di atas standar baku mutu yang ditetapkan.

Penelitian tentang jalur pencemaran merkuri di perairan telah dilakukan Budiawan (2013) dengan menggunakan aplikasi radioaktif  $^{203}\text{Hg}$ . Penelitian ini mengaplikasikan Metode system dynamics yang diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai jejak Hg dari sumber batubara PLTU kaitannya dengan peningkatan konsentrasi Hg di perairan Teluk Palabuhanratu. Kegiatan PLTU

batubara akan beroperasi selama 20 tahun dan hal ini menimbulkan kekhawatiran suatu saat Hg dalam air laut akan melebihi baku mutu air laut berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 51 Tahun 2004 untuk biota laut. Selain itu, karakteristik logam Hg yang memiliki sifat presistent dan mampu mengalami bioakumulasi dan biomagnifikasi (Lindqvist *et al.*, 1991) mengakibatkan tingkat konsentrasi pada organisme menjadi lebih tinggi daripada tingkat air laut. Kebutuhan akan suatu teknik yang dapat memprediksi jalur logam merkuri dari kegiatan PLTU untuk saat ini dibutuhkan dan diharapkan dapat melindungi kesehatan masyarakat, mempertahankan sumber daya perikanan laut, dan terjaganya ekosistem perairan laut dan juga sebagai dasar strategi manajemen pengelolaan lingkungan yang diharapkan dapat bermanfaat bagi berbagai pihak. Penelitian ini mencoba memodelkan jalur perjalanan (*pathway*) logam merkuri dari sumber sampai di perairan laut dengan karakteristik perairan laut dengan menggunakan perangkat lunak Powersim dan diharapkan dapat memprediksi konsentrasinya.

### METODE PENELITIAN

Pemodelan jalur (*pathway*) logam Hg yang bersumber dari batubara kegiatan PLTU di Teluk Palabuhanratu menggunakan metode system dynamics yang menghubungkan antar variabel model dan disimulasikan dengan perangkat lunak Powersim 2.5. Variabel dalam *system dynamics*, menurut Ford (1999) dikelompokkan dalam dua jenis yaitu level (*stock*) dan rate. Level menyatakan kondisi sistem pada setiap



Gambar 2. Diagram Simpal Kausal .

Tabel 2. Variabel model

No	Nama Variabel	Definisi Operasional	Satuan
1	Penggunaan batubara	Penggunaan batubara untuk bahan bakar PLTU	mg/m <sup>3</sup>
2	Emisi	Emisi dari <i>chimney</i> PLTU merupakan gas dan partikulat sisa pembakaran yang pertama kali terjadi pada tahun 2013.	mg/m <sup>3</sup>
3	Ceceran batubara	Ceceran batubara pertama kali terjadi pada tahun 2012 adalah batubara yang diterbangkan oleh angin pada saat <i>ship unloader</i> .	mg/m <sup>3</sup>
4	Hg anorganik udara	Jenis Merkuri yang diemisikan ke udara dapat dalam bentuk uap Merkuri (Hg <sup>0</sup> ), Oksida Merkuri dan Partikulat (USEPA, 1995).	mg/m <sup>3</sup>
5	Hg hujan	Merkuri anorganik di udara baik dalam bentuk Oksida Merkuri, Partikulat atau uap Merkuri yang teroksidasi dan tersimpan dalam curah hujan (Pirrone <i>et al.</i> , 2013).	mg/m <sup>3</sup>
6	Hg evaporasi	Penguapan air laut yang membawa Merkuri didalamnya.	mg/m <sup>3</sup>
7	Hg anorganik air	Merupakan konsentrasi Merkuri hasil pemantauan tahun 2005-2013 lokasi di laut sekitar 1 km dari batas PLTU dengan koordinat 07°02'09.5"LS; 106°32'09.2"BT dengan konsentrasi awal tahun 2005 sebesar 1 x 10 <sup>-5</sup> mg/l.	mg/l
8	Hg organik air	Merkuri anorganik di laut dapat dimetilasi oleh bakteri membentuk senyawa organomercuri yang mempunyai toksisitas lebih besar dibandingkan dengan bentuk anorganik (Paasivirta, 2000 dan Morel <i>et al.</i> , 2008). Organomercuri selain metil merkuri cepat terdekomposisi kembali menjadi merkuri anorganik (Booth & Zeller, 2005).	mg/l
11	MeHg Plankton	Metil Merkuri yang merupakan bentuk organik dari Merkuri yang terserap oleh Plankton di laut dalam model ini tidak dibedakan antara fitoplankton dan zooplankton.	mg/kg
12	MeHg ikan Plankton feeder	Metil Merkuri yang termagnifikasi dalam ikan plankton feeder yang dimaksud adalah ikan non predator dalam model ini menggunakan Ikan Mackerel (Tongkol). Ikan Tongkol melakukan ekskresi yang mempengaruhi tingkat konsentrasi MeHg air.	mg/kg
13	MeHg ikan top predator	Metil Merkuri yang termagnifikasi dalam ikan pemakan tongkol dalam model ini menggunakan ikan Tuna. Ikan Tuna melakukan ekskresi yang mempengaruhi tingkat konsentrasi MeHg air.	mg/kg
14	MeHg manusia	Metil Merkuri yang termagnifikasi dalam tubuh manusia yang mengkonsumsi ikan tongkol dan ikan tuna. Manusia juga melakukan ekskresi dari MeHg yang terdapat dalam urin.	mg/kg

saat (*state variable system*). Level merupakan hasil akumulasi di dalam sistem, sedangkan rate menyatakan aktivitas sistem. Level adalah suatu besaran (*quantity*) yang berakumulasi terhadap waktu dan rate merupakan aktivitas atau pergerakan (*movement*) atau aliran yang berkontribusi terhadap perubahan per satuan waktu dalam level. Setiap variabel akan didefinisikan dalam suatu persamaan yaitu persamaan level, persamaan rate, persamaan auxiliary atau persamaan konstanta. Variabel model seperti terlihat dalam Tabel 2. Tahapan pembangunan model yaitu sebagai berikut.

1. Pembuatan konsep dalam sebuah model CLD (*Causal Loop Diagram*).
2. Pembuatan model SFD (*Stock-Flow Diagram*) atau diagram alir.
3. *Input data*.
4. Simulasi berupa diagram waktu dan tabel waktu.
5. Validasi dengan melihat *Absolute Mean Error*

(AME) penyimpangan antara nilai rata-rata simulai terhadap aktual. Model valid jika AME kurang dari 5%.

6. Analisis Kebijakan (Uji Sensivitas)

Skenario simulasi model dilakukan untuk memprediksi peningkatan Hg pada air laut selama masa beroperasi PLTU selama 20 tahun yaitu tahun 2014 sampai dengan 2034 kemudian dibandingkan dengan baku mutu Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 51 Tahun 2004 untuk biota laut yaitu 3 x 10<sup>-4</sup> mg/l. Pemodelan menghasilkan diagram simpal kausal (*causal loop diagram*), diagram alir (*stock flow diagram*), grafik, dan tabel.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Diagram Simpial Kausal (*Causal Loop Diagram*)**

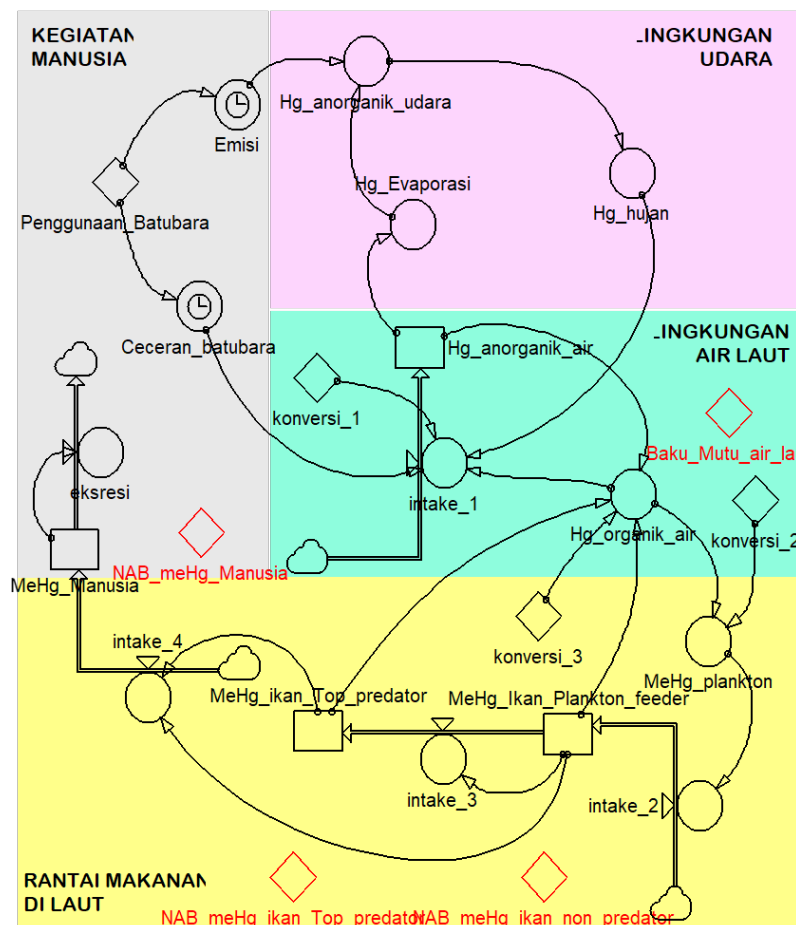
Diagram simpal kausal menggambarkan hubungan sebab akibat dari variabel model yang

digambarkan dalam bentuk panah yang saling mengait, dimana hulu panah adalah sebab dan ujung panah adalah akibat (Muhammadi *et al.*, 2001). Variabel model yang dibangun adalah batubara, emisi, merkuri, plankton, ikan, dan manusia. Diagram simpal kausal model *pathway* Hg dari batubara di Teluk Palabuhanratu disajikan pada Gambar 2.

Berdasarkan *Causal Loop Diagram* (CLD) tersebut, hubungan antar variable dapat dijelaskan sebagai berikut :

- R1: Peningkatan Hg anorganik di udara akan mengakibatkan peningkatan Hg yang terbawa oleh hujan. Peningkatan Hg yang terbawa oleh hujan akan meningkatkan konsentrasi Hg anorganik di air. Peningkatan Hg anorganik di air akan meningkatkan Hg yang terbawa pada saat evaporasi ke udara. Peningkatan Hg yang terevaporasi ke udara akan meningkatkan Hg anorganik di udara (R1: Hg anorganik udara -> Hg hujan -> Hg anorganik air -> Hg evaporasi -> Hg anorganik udara).
- R2: Peningkatan Hg anorganik air akan mengakibatkan semakin banyaknya Hg yang dimetilasi menjadi Hg organik air. Semakin banyak Hg organik air maka semakin banyak

- juga yang mengalami demetilasi kembali menjadi Hg anorganik di air (R2: Hg anorganik air -> Hg organik air -> Hg anorganik air).
- R3 :Semakin meningkat Hg organik dalam air maka Metil Merkuri (MeHg) yang terabsorpsi oleh plankton semakin meningkat. Semakin banyak MeHg yang ada pada plankton maka semakin meningkat MeHg pada ikan plankton feeder. Semakin meningkat MeHg pada ikan plankton feeder maka hasil ekskresi yang mengandung MeHg dapat meningkatkan Hg organik dalam air (R3: Hg organik air -> MeHg Plankton -> MeHg Ikan Plankton Feeder -> Hg organik air)
- R4 : Semakin meningkat Hg organik dalam air maka metil merkuri (MeHg) yang terabsorpsi oleh plankton semakin meningkat. Semakin banyak MeHg yang ada pada plankton maka semakin meningkat MeHg pada ikan plankton feeder. Semakin meningkat MeHg pada ikan plankton feeder maka semakin meningkat kandungan MeHg pada ikan top predator yang memangsanya. Semakin tinggi kandungan MeHg pada ikan top predator maka hasil ekskresi yang mengandung MeHg dapat meningkatkan Hg organik dalam air (R4: Hg organik air -> MeHg Plankton -> MeHg Ikan Plankton Feeder -> MeHg Ikan Top Predator -> Hg organik air).



Gambar 3. Stock and Flow Diagram (SFD).

### Diagram Alir

Berdasarkan diagram simpal kausal (*causal loop diagram*), model pathway logam merkuri dari batubara pada kegiatan PLTU disimulasikan sebagai diagram alir (*stock flow diagram*) dengan perangkat lunak Powersim 2.5. seperti terlihat pada Gambar 3.

### Persamaan Powersim

Berdasarkan *Stock and Flow Diagram* (SFD) persamaan powersim dari model adalah sebagai berikut:

```

init   Hg_anorganik_air = 0,000001
flow   Hg_anorganik_air = +dt*intake_1
init   MeHg_Ikan_Plankton_feeder = 0
flow   MeHg_Ikan_Plankton_feeder = +dt*intake_2
-dt*intake_3
init   MeHg_ikan_Top_predator = 0
flow   MeHg_ikan_Top_predator = +dt*intake_3
init   MeHg_Manusia = 0
flow   MeHg_Manusia = -dt*eksresi +dt*intake_4
aux    eksresi = MeHg_Manusia*10%
aux    intake_1 = ((Ceceran_batubara + Hg_hujan)*konversi_1) + (48,4%*Hg_organik_air)
aux    intake_2 = (MeHg_plankton*1)/3
aux    intake_3 = (20*MeHg_Ikan_Plankton_feeder)/30
aux    intake_4 = (MeHg_Ikan_Plankton_feeder*2) + (MeHg_ikan_Top_predator*0,30)
aux    Ceceran_batubara = IF(TIME >= 2011, (0,0000000030*Penggunaan_Batubara*0,1), 0)
aux    Emisi = IF(TIME >= 2012, (0,00000000425*Penggunaan_Batubara), 0)
aux    Hg_anorganik_udara = (Emisi*1%*50%) + Hg_Evaporasi
aux    Hg_Evaporasi = Hg_anorganik_air*10%
aux    Hg_hujan = Hg_anorganik_udara*50%
aux    Hg_organik_air = (((MeHg_Ikan_Plankton_feeder*0,061) + (MeHg_ikan_Top_predator*0,056))*konversi_3) + (Hg_anorganik_air*75%)
aux    MeHg_plankton = (Hg_organik_air*26,67%*konversi_2)
const  Baku_Mutu_air_laut = 0,0003
const  konversi_1 = 1/1000
const  konversi_2 = 1000/1
const  konversi_3 = 1/100
const  NAB_meHg_ikan_non_predator = 0,5
const  NAB_meHg_ikan_Top_predator = 1
const  NAB_meHg_Manusia = 1,6
const  Penggunaan_Batubara = 68333333333
    
```

### Analisis Konsistensi Dimensi

Sebelum melakukan uji konsistensi antara kinerja model dengan data empiris maka dilakukan konsistensi unit analisis atau analisa dimensi (Aminullah dalam Muhammadiyah *et al.* 2001). Analisa dimensi dari SFD

model dipilih variabel yang mengalami perubahan satuan, yaitu :

$$\begin{aligned} \text{Hg anorganik air} &= \text{Intake 1} \\ \text{mg/l} &= ((\text{Hg Hujan} + \text{Ceceran batubara}) \times \text{Konversi 1}) + (48,4\% \times \text{Hg organik air}) \\ &= (\text{mg/m}^3 + \text{mg/m}^3) \times 1/1000 \text{ m}^3/\text{l} + \text{mg/l} \\ &= (\text{mg/m}^3 \times \text{m}^3/\text{l}) + \text{mg/l} \\ &= \text{mg/l} \\ \text{MeHg Plankton} &= 26,67\% \times \text{Hg organik air} \times \text{Konversi 2} \\ \text{mg/kg} &= \text{mg/l} \times 1000/1 \text{ l/kg} \\ &= \text{mg/kg} \\ \text{Merkuri organik air} &= (\text{MeHg ikan top Predator} \times 5,6\%) + (\text{MeHg ikan Plankton Feeder} \times 6,1\%) \times \text{konversi 3} \\ \text{mg/l} &= (\text{mg/kg} + \text{mg/kg}) \times 1/100 \text{ kg/l} \\ &= \text{mg/kg} \times \text{kg/l} \\ &= \text{mg/l} \end{aligned}$$

Berdasarkan analisis dimensi dan satuan yang telah dijelaskan dalam definisi variabel Tabel 2, maka seluruh variabel model telah konsisten secara dimensi.

### Asumsi Model

Asumsi yang digunakan dalam model adalah :

- Tidak adanya *delay* dalam proses jejak merkuri baik di udara, air maupun pada rantai makanan.
- Perhitungan MeHg pada ikan plankton feeder menggunakan asumsi berat badan ikan plankton feeder 0,3 kg. Tingkat eksresi MeHg dalam ikan plankton feeder menggunakan Ikan Mackerel (tongkol) di Atlantic sebesar 6,1% dari MeHg yang terdapat di tubuhnya (Bacaksızlar & Önsel, 2013).
- Perhitungan MeHg pada ikan top predator menggunakan asumsi ikan tuna dengan berat badan 30 kg makan 20 ekor tongkol seberat 0,3 kg dalam setahun. Tingkat eksresi MeHg dalam ikan top predator menggunakan Ikan Tuna Bluefin dari Laut Mediterania sebesar 5,6% dari MeHg yang terdapat di tubuhnya (Bacaksızlar & Önsel, 2013).
- Senyawa MeHg pada manusia dihitung berdasarkan asumsi berat badan 55 kg mengkonsumsi ikan sesuai tingkat konsumsi ikan di Jawa Barat Tahun 2012 sebesar 23 Kg/Kapita setiap tahunnya (BPS, 2013) dengan asumsi terdiri atas ikan Tuna 10 kg dan ikan tongkol sebanyak 13 kg. Tingkat eksresi dari MeHg pada manusia adalah MeHg dalam urin diasumsikan 10%.

Simulasi dilakukan untuk memprediksi peningkatan Hg pada air laut selama masa 20 tahun beroperasi PLTU yaitu pada 2014 sampai dengan 2034 kemudian dibandingkan dengan baku mutu Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 51 Tahun 2004 untuk biota laut yaitu  $3 \times 10^{-4}$  mg/l, simulasi bioakumulasi dan biomagnifikasi logam Hg di perairan pada biota.

### Skenario awal

Skenario awal berdasarkan data lapangan adalah sebelum tahun 2012 merkuri anorganik di air laut adalah

$1 \times 10^{-5}$  mg/l, belum ada merkuri anorganik di udara dan belum terjadi bioakumulasi dan biomagnifikasi.

Data Masukan Model :

1. Penggunaan batubara dilakukan pendekatan kapasitas maksimum sebesar 4.100.000 ton/tahun ditempatkan di area 10.000 m<sup>3</sup> dan tinggi 6 m (PLTU, 2012) maka konversi satuan menjadi 68.333.333.333,33 mg/m<sup>3</sup>.
2. Emisi dari Chimney setinggi 215 m dilakukan dengan pendekatan desain maksimum 850 mg/m<sup>3</sup> (PLN, 2006) atau  $(4,56 \times 10^{-9})\%$  dari penggunaan batubara.
3. Ceceran batubara terjadi pada saat angin >10 knots menerbangkan sekitar 1000 mg setiap *ship unloader*, dengan ukuran grab 75 m<sup>3</sup> dalam 1 hari ada (2 x 24 jam) *ship unloader* (PLN, 2006) atau  $(3,0 \times 10^{-10})\%$  dari penggunaan batubara.
4. Perhitungan Hg anorganik di udara berdasarkan udara sisa pembakaran mengandung 1% Partikulat kemudian didispersikan ke udara melalui chimney setinggi 215 m (PLN, 2006) dan perkiraan kandungan Merkuri anorganik sebesar 50% dari emisi pembakaran batubara (EPA, 2000).
5. Unsur Hg anorganik di udara yang terbawa oleh angin dan curah hujan maka Hg dalam hujan yang jatuh di laut daerah model diasumsikan ada 50% dari Hg anorganik di udara.
6. Unsur Hg pada evaporasi adalah *evasion Mercury* sebesar 10% dari mercury perairan (UNEP, 2013)
7. Unsur Hg organik dalam air hasil metilasi dari Merkuri anorganik sebesar 75% , yang mengalami demetilasi sebesar 48,4% (Driscoll *et al.*, 2013)
8. Metil Merkuri (MeHg) pada plankton berdasarkan persentase MeHg dalam air yang masuk ke biota sebesar 26,67% (UNEP, 2013)
9. Konversi satuan dari mg/kg ke mg/L adalah 1/100 kg/l jadi asumsinya dalam 100 liter air ada 1 kg ikan. Konversi satuan dari mg/l ke mg/kg adalah 1000/1 kg/l asumsinya dalam 1000 liter air ada 1 kg plankton. Konversi mg/m<sup>3</sup> menjadi mg/l adalah 1 m<sup>3</sup> = 1000 dm<sup>3</sup> = 1000 liter.

### Hasil Simulasi

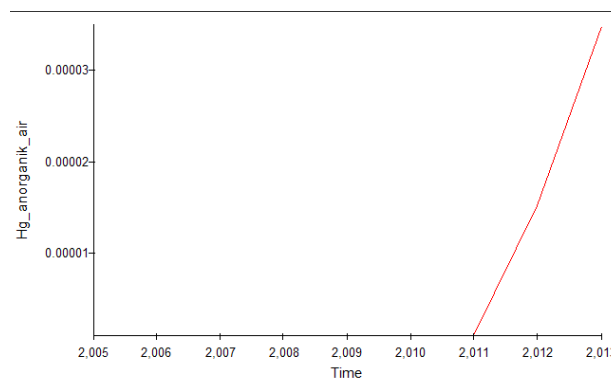
Setelah dilakukan simulasi sesuai data lapangan dari tahun 2005 - 2013 maka di peroleh hasil seperti yang disajikan dalam Tabel 3 dan pada Gambar 4.

### Validasi Model

Langkah selanjutnya adalah melakukan validasi model. Validitas kinerja model untuk memperoleh keyakinan bahwa kinerja model sesuai dengan kinerja sistem nyata adalah dengan membandingkan output model dengan data empirik, kemudian dilakukan uji statistik untuk melihat penyimpangan dengan *Absolute Mean Error* (AME) yaitu penyimpangan antara nilai rata-rata simulasi terhadap *actual* (Muhammadi *et al.*, 2001).

Tabel 3. Hasil Simulasi

Time	Hg_anorganik_air
2,005	0.000001
2,006	0.000001
2,007	0.00000101
2,008	0.00000101
2,009	0.00000101
2,010	0.00000101
2,011	0.00000102
2,012	0.0000154
2,013	0.0000348



Gambar 4. Hasil Simulasi Model untuk parameter merkuri di Laut.

Batas penyimpangan yang diterima adalah < 30% karena banyak faktor yang tidak dapat dikendalikan dalam model. Hasil uji validitas untuk variabel populasi pada 2005-2013 (Tabel 2-4 dan Gambar 2-5) menunjukkan nilai AME sebesar 27,52 dan model dinyatakan valid.

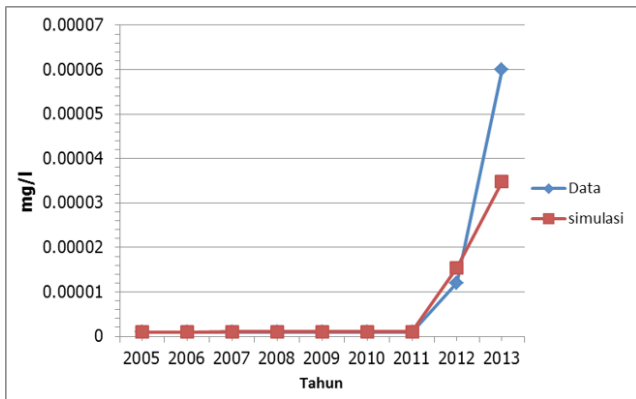
### Prediksi Peningkatan Konsentrasi Hg di Perairan

Hasil simulasi model jalur Hg yang bersumber dari batubara kegiatan PLTU seperti terlihat pada Gambar 4 menunjukkan terjadinya peningkatan logam Hg pada

Tabel 4. Hasil Validasi

Tahun	Data	Simulasi
2005	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
2006	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
2007	$1 \times 10^{-5}$	$1,01 \times 10^{-6}$
2008	$1 \times 10^{-5}$	$1,01 \times 10^{-6}$
2009	$1 \times 10^{-5}$	$1,01 \times 10^{-6}$
2010	$1 \times 10^{-5}$	$1,01 \times 10^{-6}$
2011	$1 \times 10^{-5}$	$1,02 \times 10^{-6}$
2012	$1,2 \times 10^{-5}$	$1,54 \times 10^{-6}$
2013	$6 \times 10^{-5}$	$3,48 \times 10^{-6}$
Rata –Rata	$9 \times 10^{-6}$	$6,36 \times 10^{-6}$
AME	27,52	





Gambar 5. Grafik Validasi Data lapangan dengan hasil simulasi.

air laut selama 20 tahun masa beroperasi PLTU (2014-2034). Konsentrasi Hg tersebut jika dibandingkan dengan baku mutu berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 51 Tahun 2004 untuk biota laut, telah melebihi baku mutu yaitu  $3 \times 10^{-4}$  mg/l.

Berdasarkan hasil simulasi, terlihat bahwa perilaku kenaikan konsentrasi logam Hg sangat lambat di perairan seperti terlihat dalam Tabel 5 dan konsentrasi logam Hg akan melebihi baku mutu pada 2027.

**Prediksi Biomagnifikasi**

Selanjutnya dilakukan simulasi untuk memprediksi terjadinya bioakumulasi dan biomagnifikasi dari

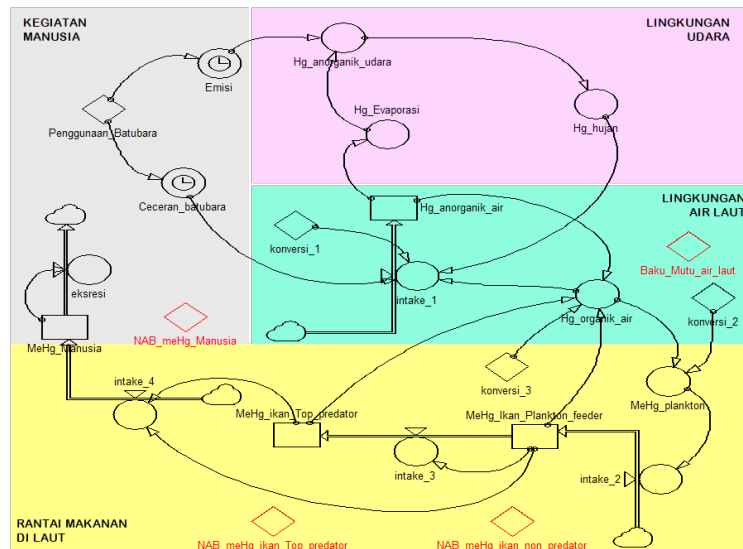
peningkatan konsentrasi logam Hg di perairan pada ikan plankton *feeder*, dalam model ini mengambil contoh ikan tongkol. Hasil simulasi seperti terlihat pada Gambar 8 yang menunjukkan adanya peningkatan mulai tahun 2017.

Proses biomagnifikasi terlihat dengan membandingkan Gambar 8, Gambar 9, dan Gambar 10 bahwa dalam rantai makanan konsumen dengan tingkatan tertinggi memiliki konsentrasi lebih besar, namun ketiganya masih di bawah level toleransi MeHg menurut UNEP (2008) tentang nilai ambang batas MeHg pada ikan *non predator*, ikan predator dan pada manusia.

Mekanisme terjadinya biomagnifikasi dapat dijelaskan melalui emisi merkuri yang terlepas ke udara bersamaan dengan polutan lainnya. Merkuri (Hg) yang teremisikan ke udara dapat dalam bentuk uap Merkuri ( $Hg^0$ ), Oksida Merkuri dan Partikulat (USEPA, 1995). Uap Hg dapat teroksidasi dan tersimpan dalam curah hujan dan jatuh ke laut. Penguapan air laut atau proses evaporasi juga dapat membawa Hg anorganik dari laut sekitar 10% dari Hg perairan kembali ke udara yang disebut evasion Merkuri (UNEP, 2013). Merkuri anorganik yang jatuh ke air akan mengalami proses metilasi. Metilasi adalah Merkuri yang berada dalam bentuk bebas oleh bakteri akan dirubah menjadi organomerkuri yang merupakan hasil dari metabolisme bakteri. Hg organik hasil metilasi sekitar

Tabel 5. Prediksi Peningkatan Konsentrasi Merkuri (Hg) Selama PLTU Beroperasi

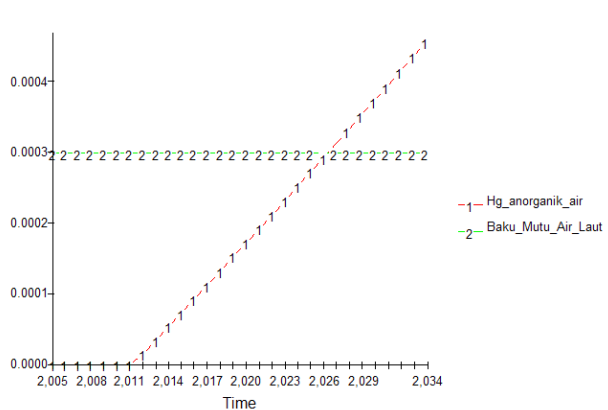
Time	Hg_anorganik_ais	Hg_Ikan_Plankton_feeder	Hg_ikan_Top_predator	MeHg_Manusia
2,005	0.000001	0.00	0.00	0.00
2,006	0.000001	0.0000667	0.00	0.00
2,007	0.00000101	0.0000927	0.0000445	0.000133
2,008	0.00000101	0.000105	0.000106	0.000319
2,009	0.00000101	0.000113	0.000176	0.000529
2,010	0.00000101	0.00012	0.000252	0.000756
2,011	0.00000102	0.000127	0.000332	0.000996
2,012	0.0000154	0.000133	0.000416	0.00125
2,013	0.0000348	0.0011	0.000505	0.00152
2,014	0.0000544	0.00277	0.00124	0.00371
2,015	0.0000739	0.00476	0.00309	0.00926
2,016	0.0000936	0.00693	0.00626	0.0188
2,017	0.000113	0.00924	0.0109	0.0326
2,018	0.000133	0.0117	0.017	0.0511
2,019	0.000153	0.0142	0.0248	0.0745
2,020	0.000173	0.0169	0.0343	0.103
2,021	0.000193	0.0198	0.0456	0.137
2,022	0.000213	0.0228	0.0588	0.176
2,023	0.000233	0.0259	0.074	0.222
2,024	0.000253	0.0293	0.0913	0.274
2,025	0.000273	0.0328	0.111	0.332
2,026	0.000294	0.0364	0.133	0.398
2,027	0.000314	0.0403	0.157	0.471
2,028	0.000335	0.0444	0.184	0.552
2,029	0.000356	0.0487	0.213	0.64
2,030	0.000377	0.0532	0.246	0.738
2,031	0.000397	0.058	0.281	0.844
2,032	0.000419	0.063	0.32	0.96
2,033	0.00044	0.0683	0.362	1.09
2,034	0.000461	0.0738	0.408	1.22



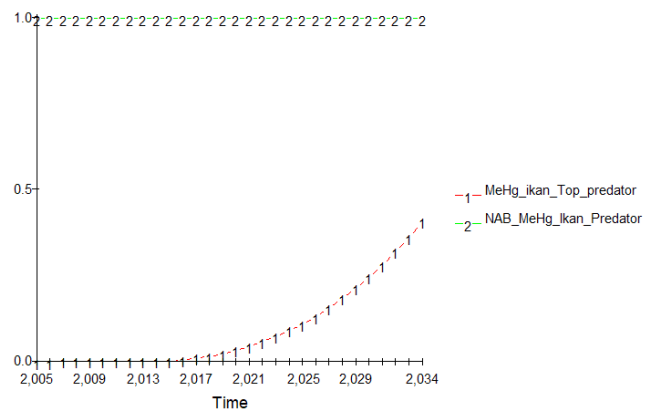
Gambar 6. Diagram Alir Model Pathway Logam Merkuri dari Batubara pada Kegiatan PLTU.

75% (Driscoll *et al.*, 2013). Selain itu, didukung juga dengan karakteristik morfologi wilayah PLTU tersebut berada, logam Hg yang berada di perairan dapat terendapkan dan karena adanya proses sedimentasi yang tinggi dari partikel tersuspensi yang terbawa mengikuti arus yang sejajar pantai (*long current shore*),

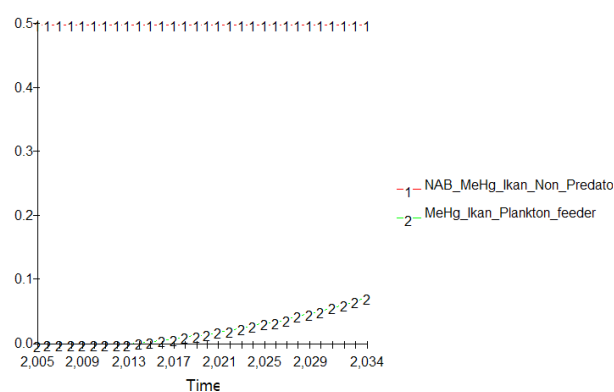
berada pada daerah cekungan teluk dan karena sifat berat jenis logam yang lebih besar dari berat jenis air. Terjadinya pengendapan akan berpotensi terjadinya pajan (*exposure*) logam Hg pada biota laut. Kemudian melalui rantai makanan dari organisme penyaring (*filter feeder*) yang menyaring plankton baik fitoplankton



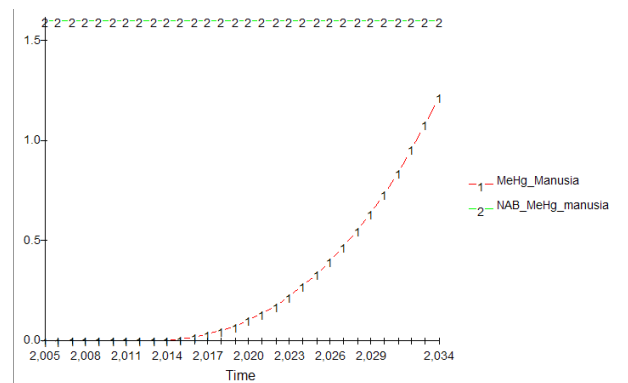
Gambar 7. Prediksi peningkatan Merkuri selama PLTU Beroperasi 2014-2034.



Gambar 9. Prediksi biomagnifikasi pada Ikan Top Predator.



Gambar 8. Prediksi biomagnifikasi pada Ikan plankton feeder.



Gambar 10. Prediksi biomagnifikasi pada Manusia.

maupun zooplankton, sehingga terjadi peningkatan kadar logam dengan meningkatnya tingkatan makanan (*tropic level*) yang dikenal dengan istilah biomagnifikasi. Dengan demikian telah terjadi akumulasi kadar logam yang lebih tinggi seiring makin tingginya kedudukan biota dalam rantai makanan (*food chain*). Sebagai contoh, berdasarkan hasil penelitian didapatkan kadar Hg dalam ikan tuna dan ikan cucut berkisar anatar 0,2 1 mg/kg (200-1000 µg/kg).

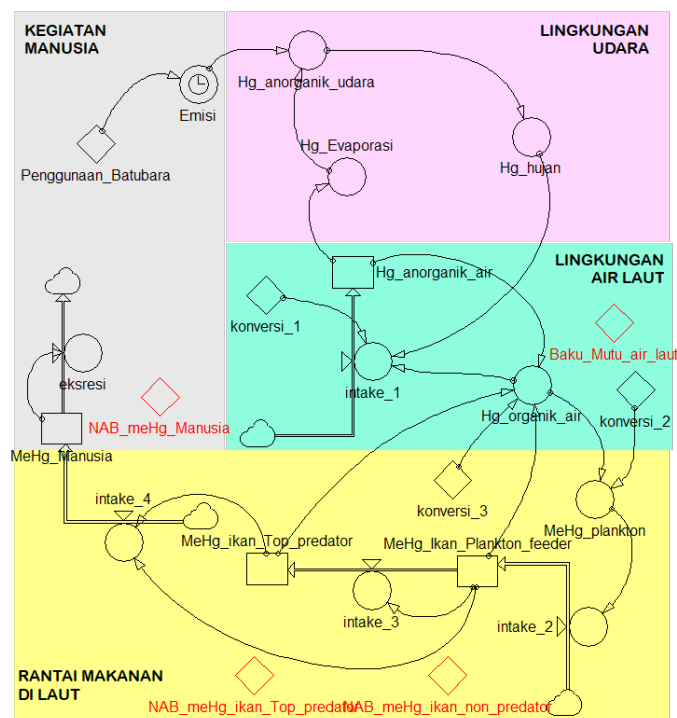
Proses bioakumulasi dari jalur air dan partikulat serta biomagnifikasi metil merkuri pada rantai makanan akuatik (Suseno, 2011). Merkuri yang masuk ke rantai makanan berawal dari plankton dengan tingkat absorpsi sebesar 26,67% (UNEP, 2013). Kemudian plankton ini akan dimakan ikan plankton *feeder* atau ikan non predator. Salah satu ikan *non* predator dan plankton *feeder* adalah ikan Mackerel (tongkol). Banyaknya MeHg yang ada dalam tubuh ikan bergantung pada banyaknya plankton yang dimakan dan berat tubuh ikan itu sendiri. Pada proses ekskresi yaitu pada urine ikan dikeluarkan pula MeHg sebesar 6,1% (Bacaksızlar & Önsel, 2013), hal ini akan mempengaruhi tingkat konsentrasi MeHg air. Level MeHg ditoleransi pada ikan plankton *feeder* adalah 0,5 mg MeHg /kg.

Proses makan memakan di laut ikan plankton *feeder* akan dimakan oleh ikan top predator dalam hal ini ikan tuna yang seringkali memangsa ikan tongkol. Terjadinya biomagnifikasi MeHg pada ikan tuna bergantung pada banyaknya ikan tongkol yang dimakan dan bobot tubuh ikan tuna, tingkat ekskresi

pada ikan tuna sebesar 5,6% (Bacaksızlar & Önsel, 2013). Level meHg yang dapat ditoleransi pada ikan predator adalah 1 mg MeHg/kg (UNEP, 2008).

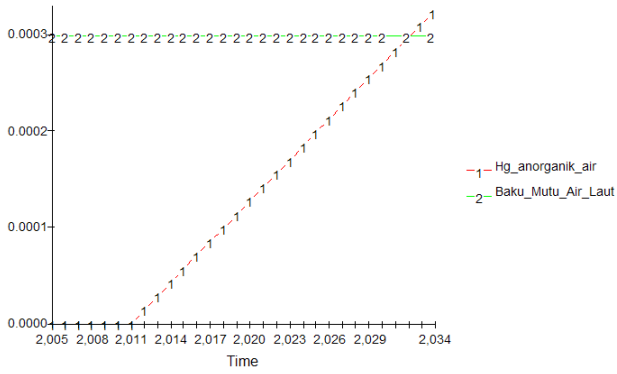
Perjalanan MeHg tidak berhenti sampai di ikan tuna karena pada tubuh manusia juga dapat ditemukan Metil Merkuri (MeHg) karena rantai makanan ini pada akhirnya akan sampai ke manusia. Jalur utama paparan MeHg pada manusia salah satunya adalah melalui konsumsi ikan (Barkey *et al.*, 2005). Semakin banyak mengkonsumsi ikan yang mengandung MeHg maka semakin menumpuk kandungan meHg pada manusia. Tingkat konsumsi ikan di Jawa Barat sendiri menurut data BPS, 2013 sebesar 23 kg/kapita. Seperti halnya pada ikan, berat tubuh manusia juga menentukan kadar MeHg yang tersimpan dalam tubuh. Level toleransi MeHg pada manusia adalah 1,6 mg/kg berat badan (UNEP, 2008).

Ikan tercemar merkuri telah dilaporkan terjadi di beberapa belahan dunia, diantaranya di Luxembourg, kadar pencemaran merkuri pada level 10,3-534,5 ng/g berat basah ikan (Boscher *et al.*, 2010); pencemaran merkuri Canadian Arctic dan danau Caspia, mencapai 500-1000 ng per gram ikan basah dan > 840 ng/L sampel (Sari *et al.*, 1981 dalam Azimi & Sadeghi, 2013). Sedangkan Standard maksimum toleransi metil merkuri dalam makanam hanya 1,6 ng per minggu per kilo gram berat badan orang dewasa. Menurut WHO, *the United States Environmental Protection Agency* (EPA) and *National Research Council* (NRC) (FAO/WHO, 2003; NRDC, 2000).



Gambar 11. SFD Peningkatan Merkuri Sumber Emisi.





Gambar 14. Prediksi Peningkatan Merkuri Sumber Ceceran batubara.

Berdasarkan hasil simulasi terhadap faktor emisi dan ceceran batubara, pengelolaan lingkungan yang untuk mengendalikan peningkatan merkuri di air laut dari kegiatan PLTU Palabuanratu adalah dengan menghilangkan variabel ceceran batubara. Dalam simulasi model pengendalian merkuri menggunakan intervensi struktural dengan menambahkan variabel pengelolaan lingkungan dengan fungsi graph dimana pengelolaan 100% adalah angka 1 kemudian apabila tidak ada pengelolaan adalah angka 0. *Stock and Flow Diagram* (SFD) hasil intervensi disajikan pada Gambar 15. Hasil simulasi skenario intervensi disajikan pada Gambar 16.

Dengan adanya pengelolaan lingkungan pada ceceran batubara maka selama PLTU beroperasi yaitu

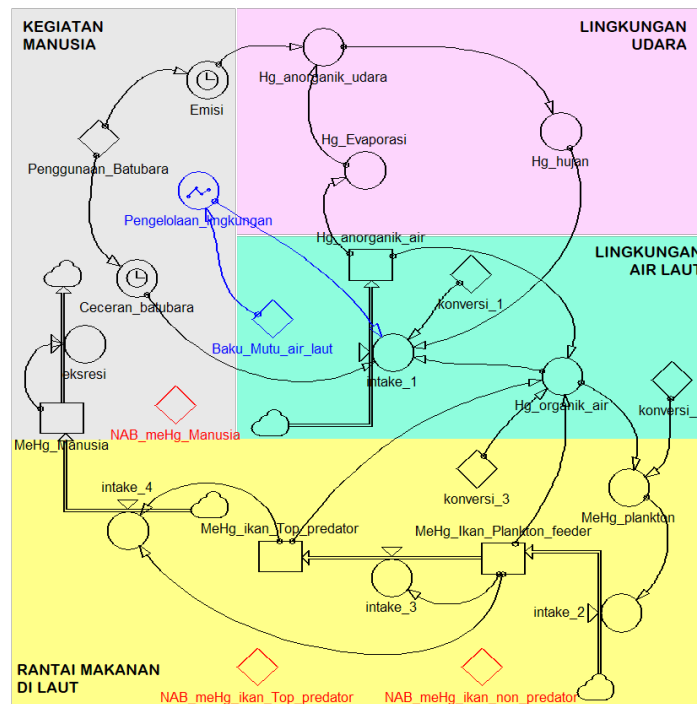
sampai dengan tahun 2034 Merkuri anorganik di air laut tetap memenuhi baku mutu. Dalam pelaksanaan di lapangan pengelolaan lingkungan yang untuk ceceran batubara dapat dilakukan dengan upaya sebagai berikut:

1. Tidak melakukan *ship unloader* pada saat angin kencang > 10 knots atau yang berpotensi menimbulkan gelombang laut yang tinggi hal ini harus ditunjang pengamatan cuaca atau memasang pengukur angin.
2. Memberikan peraturan pada pemasok batubara agar menutup rapat muatan batubara agar tidak mudah diterbangkan angin, kemudian menjamin kelayakan batubara yang dikirim apabila didapati batubara berasap maka tidak boleh memasuki Pelabuhan Khusus batubara.
3. Mengatur jadwal pemasok batubara sehingga tidak terjadi antrian tongkang di sekitar Pelabuhan khusus yang berpotensi menerbangkan batubara di dalam Tongkang.
4. Memelihara dan memastikan peralatan dan operasional di wilayah *ship unloader* seperti dust suppression system yang berfungsi menekan atau menahan debu batubara agar tidak beterbangan pada saat batubara dipindahkan menuju *belt conveyor* bekerja sesuai *Standard Operasional Prosedur* (SOP).

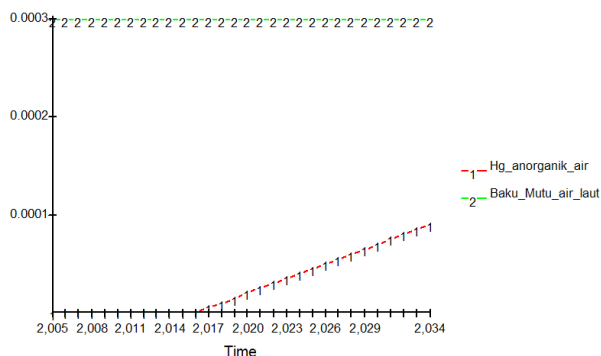
## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Hasil kesimpulan berdasarkan pemodelan logam Hg yang bersumber dari batubara pada kegiatan PLTU,



Gambar 15. Stock and Flow Diagram (SFD) hasil intervensi.



Gambar 12. Grafik Hasil Simulasi skenario intervensi.

adalah sebagai berikut:

1. Konsentrasi logam merkuri pada air laut akan terus meningkat selama masa beroperasi PLTU dari tahun 2014 sampai dengan 2034 dan konsentrasinya akan melebihi baku mutu berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 51 Tahun 2004 untuk biota laut pada Tahun 2027.
2. Terjadinya biomagnifikasi kepada ikan plankton feeder, ikan top predator dan kepada manusia mulai tahun 2017 dimana konsentrasi Metil Merkuri (MeHg) pada manusia sebagai konsumen tertinggi lebih besar dibanding pada ikan top predator dan Ikan Plankton feeder, namun masih dibawah level ketiganya masih dibawah level toleransi MeHg menurut UNEP (2008) tentang nilai ambang batas MeHg pada ikan non predator, ikan predator dan pada manusia.
3. Faktor yang dominan meningkatkan Merkuri anorganik dalam air laut adalah cecceran batubara.

#### Saran

Intervensi yang tepat adalah intervensi struktural yaitu melakukan pengelolaan cecceran batubara dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Tidak melakukan ship unloader pada saat angin kencang adanya pengamatan cuaca.
2. Memberikan peraturan pada pemasok batubara (menutup rapat muatan, kelayakn batubara yang dikirim).
3. Mengatur jadwal pemasok batubara.
4. Menjalankan proses ship unloader sesuai SOP.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Azimi, S., & Sadeghi, M. (2013). Effect of mercury pollution on the urban environment and human health. *Environment and Ecology Research*, 1(1), 12-20.
- Bacaksızlar, N.G., & Önsel, N. (2013). Modeling The Dynamics Of Methylmercury Biomagnification. Boğaziçi University industrial Engineering Department, 34342 Bebek Istanbul Turkey.

Barkey, T., Dobler, I.W. (2005). Microbial Transformations of Mercury: Potentials, Challenges, and Achievements in Controlling Mercury Toxicity in the Environment. *Journal Advances in Applied Microbiology*, 57, 1-54.

Boscher, A., Gobert, S., Guignard, C., Ziebel, J., L'Hoste, L., Gutleb, A.C., Cauchie, H.M., Hoffmann, L., & Schmidt, G. (2010). Chemical contaminants in fish species from rivers in the North of Luxembourg: potential impact on the Eurasian otter (*Lutra lutra*). *Chemosphere*, 78, 785–792.

Booth, S., & Zeller, D. (2005). Mercury in Food Webs, and Marine Mammals: Implications of Diet and Climate Change for Human Health. *Journal Environmental Health Perspectives*, 113(5), 521-526.

BPS. (2013). Jawa Barat dalam Angka 2012. Balai Pusat Statistik Jawa Barat.

Budiono, A. (2003). Pengaruh Pencemaran Merkuri Terhadap Biota Air. *Makalah Pengantar Sains, Jenjang Doktor Program Pascasarjana*, IPB Bogor.

Driscoll, C.T., Mason, R.P., Chan, H.M, Jacob, D.J., & Pirrone, N. (2013). Mercury as a Global Pollutant: Sources, Pathways, and Effects. *Journal Environmental Science & Technology*, 47.

EPA. (2000). To regulate mercury and other air toxics emissions from coal- and oil-fired powerplants. EPA fact sheet.

Herman, D.Z. (2006). Tinjauan terhadap tailing mengandung unsur pencemar As, Hg, Pb, dan Cd. *Jurnal Geologi Indonesia*, 1(1) 31-36.

Husodo, K.R.T Sarwono, A.H., Suhardini, R.J., Wijanarko, S.M., Siran, D., Mardani, T., Iskandar, G., Kasjono, H.S., & Supriadi T. (2005). Kontaminasi merkuri di kalangan pekerja Yogyakarta. Kasus penambangan emas Kulonprogo. *Jurnal Lembaga Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Gadjah Mada*. 9(20), 51-58.

Lasut, M.T., Edinger, E.N., & Yaqsuda, Y. (2005). Contamination of mercury in marine environment of Buyat Bay, North Sulawesi, Indonesia and its potential impact to human. Proceeding of international seminar on mining environment and sustainable development. A lesson from the gold mining. Controversy in Buyat Bay, North Sulawesi. Indonesia.

- Lindqvist, O., Johnsson, K., Aastrup, M., Andersson, A., & Bringmark, L. (1991). Mercury in the Swedish environment recent research on causes, consequences and corrective methods. *Journal Water, Air and Soil Pollution*, 55, 1-251.
- Mahmud, M. (2012). *Model sebaran spasial temporal konsentrasi merkuri akibat penambangan emas tradisional sebagai dasar monitoring dan evaluasi pencemaran di ekosistem Sungai Tulabolo Provinsi Gorontalo*. Disertasi. Program Studi Geografi. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta
- Martaningtyas, D. (2004). *Bahan Cemar Logam Berat*. Cakrawala, Jakarta.
- Morel, F.M.M., Kraepiel, A.M.L., & Amyot, M. (2008). The Chemical Cycle and Bioaccumulation of Mercury. *Annual Review Ecology System*, 29, 543–66.
- Muhammadi., Aminullah, E., & Soesilo, B. (2001). *Analisis Sistem Dinamis: Lingkungan Hidup, Sosial, Ekonomi, Manajemen*. UMJ Press, Jakarta.
- Paasivirta, J.K. (2000). Long-term Effects of Bioaccumulation in Ecosystems. *The Handbook of Environmental Chemistry*, Vol. 2 Part J Bioaccumulation (ed. by B. Beek) © Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Pirrone, N., Aas, W., Cinnirella, S., Ebinghaus, R., Hedgecock, I.M., Pacyna, J., Sprovieri, F., & Sunderland, E. (2013). Toward the next generation of air quality monitoring: Mercury. *Journal Atmospheric Environment*, 80, 599-611.
- PLN. (2006). *ANDAL Pembangunan PLTU 3 x 350 MW Sukabumi Palabuhanratu dan SUTT 150 KV terkait, PT.PLN (Persero) Jakarta*.
- PLTU. (2013). *Laporan Pelaksanaan RKL-RPL PLTU 3 x 300 MW Palabuhan Ratu dan Palabuhan Khusus Batubara*, PT. PLN (Persero) UPK Palabuhanratu Sukabumi.
- Ravichandran, M. (2004). Interactions between mercury and dissolved organic matter. *Journal Chemosphere*, 55, 319-331.
- Sembel, D.T. (2015). *Toksikologi lingkungan. Dampak pencemaran dari berbagai bahan kimia dalam kehidupan sehari-hari*. Andi. Yogyakarta.
- Simson, S.S., Apte, R., Jung, G.B., & Hales, L. (2005). Trace metal concentration in water, sediments and fish tissues from marine locations in the vicinity of the Minahasa Raya gold mining (North Sulawesi) [Proceeding]. *Proceeding of international seminar on mining, environment, and sustainable development : a lesson from the gold mining, controversy in Buyat Bay, North Sulawesi, Indonesia*.
- Smith, F.A., Sharma, R.P., Lynn, R.L., & Low, J.B. (1974). Mercury and selected pesticide levels in fish and wildlife of Utah: Levels of mercury in fish. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 12, 153-157.
- Suseno, H. (2011). *Bioakumulasi Merkuri Dan Metil Merkuri Oleh Oreochromis Mossambicus Menggunakan Aplikasi Perunut Radioaktif: Pengaruh Konsentrasi, Salinitas, Partikulat, Ukuran Ikan Dan Kontribusi Jalur Pakan*. Disertasi Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam Program Studi Doktor Ilmu Kimia, Universitas Indonesia Depok.
- UNEP. (2008). *Guidance for identifying populations at risk from mercury exposure*. Retrieved May 21, 2012, from World Health Organization Chemicals is a part of UNEP's Division of Technology.
- UNEP. (2013). *Global Mercury Assessment 2013: Sources, Atmospheric and Aquatic Releases and Transport*. UNEP's Division of Technology.
- USEPA. (1995). *Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Volume I: Stationary Point and Area Sources, AP-42*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards.