

# **DAMPAK PERTUMBUHAN PENDUDUK TERHADAP BEBAN SUMBER PENCEMAR DI DANAU SENTANI DENGAN MODEL SISTEM DINAMIK BERWAWASAN LINGKUNGAN**

## **POPULATION GROWTH IMPACT TO POLLUTION LOAD IN SENTANI LAKE USING ENVIRONMENTAL BASED DYNAMIC SYSTEM MODEL**

**Auldry F. Walukow**  
**Jurusan PFMIPA FKIP Universitas Cenderawasih,**  
**Jl. Camp Wolker Jayapura, Papua**  
**e-mail: auldrywalukow@yahoo.co.id**

### **Abstrak**

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis erosi di daerah pengaliran sungai (DPS) Sentani dan mengaplikasi model sistem dinamik untuk menganalisis pengaruh pertumbuhan penduduk terhadap beban sumber pencemar Danau Sentani. Metode yang digunakan adalah *Universal Soil Loss Equation* (USLE) untuk memprediksi erosi dari bidang tanah dan model sistem dinamik dengan menggunakan *tool* powersim 2.5d untuk memperoleh model pengelolaan Danau Sentani yang berkelanjutan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan model dinamik untuk pengelolaan dan perencanaan wilayah permukiman dan pertanian di sekitar Danau Sentani dapat membantu untuk mengetahui perkembangan sumber-sumber pencemar, erosi, dan batas waktu habisnya luas hutan, sehingga kebijakan strategis berkaitan dengan degradasi DPS Sentani dapat diantisipasi secara lebih dini. Selain itu, pertambahan penduduk merupakan faktor pengungkit (*leverage factor*) terhadap peningkatan sumber pencemar, keterbatasan lahan hutan, erosi lahan permukiman, dan erosi lahan pertanian. Namun perlu juga dilakukan intervensi struktural terhadap luas lahan permukiman dan luas lahan pertanian. Model dinamik sumber pencemar merupakan bentuk *Archetype Shifting the Burden*.

Kata kunci : sistem dinamik, pencemaran, limbah, erosi

### **Abstract**

This research was aimed to analyze the erosion in the watershed (watershed) Sentani and to apply dynamic system model to analyze the effect of population growth on the source of pollutant loads in Sentani Lake. Universal Soil Loss Equation (USLE) method was used to estimate soil erosion from land and dynamic system model using powersim 2.5D tools in order to obtain a model of sustainable Sentani Lake management. Results of this experiment showed that the dynamic model approach to the management and planning of settlements and agricultural areas around Sentani Lake might facilitate the solution of pollutant source, erosion, and deforestation problems and determination of strategic policy for coping with these problems. In addition, population growth was a leverage factor to the increase of pollutant sources, the limitation of forest land, residential land erosion, and erosion of agricultural land. However, structural intervention to human settlements and agricultural land should also be performed. The dynamic model of pollutant sources was Archetype Shifting the Burden.

Keywords: dynamic system, pollution, waste, erosion



## 1. PENDAHULUAN

Wilayah Danau Sentani berada di dua wilayah administratif, yaitu Kabupaten Jayapura dan Kota Jayapura, Propinsi Papua. Danau ini memiliki luas 9630 Ha dengan ketinggian 75 m di atas permukaan laut. Danau tersebut merupakan salah satu sumber daya alam yang sangat potensial jika dikelola dengan baik, di antaranya untuk sumber air bersih, perikanan, transportasi, irigasi, dan ekowisata. Potensi ini sangat menarik investor untuk menanamkan modal yang pada gilirannya akan dapat menaikkan pendapatan asli daerah.

Namun danau yang diharapkan memberi nilai tambah ekonomi, sosial, dan ekologi ini telah terancam keberlanjutannya karena degradasi lingkungan. Permasalahan yang muncul di sekitar Danau Sentani adalah tingginya erosi dan pencemaran akibat limbah rumah tangga, peternakan, dan industri yang menyebabkan kualitas air Danau Sentani menjadi rendah untuk zat-zat tertentu. Misalnya, kadar tembaga dan seng, melampaui baku mutu menurut Peraturan Pemerintah Nomor 82/2001 (Dinas Pekerjaan Umum, 2007). Menurut Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (2005), faktor utama penyebab banjir di daerah pengaliran sungai (DPS) Sentani adalah hilangnya sebagian besar vegetasi/hutan penutup lahan, akibat perladangan berpindah di bagian hulu sungai sehingga daya resapan air ke dalam tanah menjadi lebih kecil. Apabila tidak dilakukan upaya-upaya serius dalam penanggulangan degradasi lingkungan maka dapat berdampak pada kerusakan kondisi lingkungan secara keseluruhan.

Salah satu faktor penting yang mempercepat peningkatan sumber pencemar dan percepatan konversi lahan adalah pertumbuhan penduduk. Pertumbuhan penduduk menyebabkan peningkatan luas lahan permukiman dan lahan pertanian. Akhirnya menyebabkan penurunan luas hutan di DPS Sentani dan berdampak pada degradasi lingkungan Danau Sentani. Laju konversi lahan disebabkan oleh faktor

aktivitas mata pencaharian, tekanan hak pemanfaatan hutan (HPK), sosial ekonomi, dan rendahnya tingkat pendidikan. Hal ini sejalan dengan simpulan Neto *et al.* (2006) yang menyatakan bahwa penambahan populasi dan perkembangan industri sejalan dengan meningkatnya pencemaran air dan degradasi lingkungan. Oleh sebab itu, peran serta masyarakat dalam bentuk kesadaran akan masalah lingkungan sangat dibutuhkan untuk mencegah degradasi lingkungan. Degradasi lingkungan di Danau Sentani harus ditanggulangi dengan pendekatan sistem yang kompleks karena adanya ke-terkaitan antara dengan penduduk dengan sejumlah faktor kebutuhan, seperti: per-mukiman, pendidikan, pekerjaan, pertanian, dan lingkungan. Begitu pula pencemaran Danau Sentani disebabkan oleh berbagai hal dan berlanjut secara terus menerus dalam fungsi waktu. Salah satu solusi untuk menangani sistem yang kompleks ini adalah melalui pendekatan model dinamik.

Penelitian ini mempelajari pengaruh pertumbuhan penduduk terhadap beban sumber pencemar di Danau Sentani dengan menggunakan metode model sistem dinamik guna memperoleh model pengelolaan Danau Sentani yang berkelanjutan. Berdasarkan pemikiran ini, maka penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis erosi di DAS Sentani dan merekayasa model sistem dinamik untuk menganalisis pengaruh pertumbuhan penduduk terhadap beban sumber pencemar Danau Sentani.

## 2. METODA

### Memprediksi Erosi

Menurut Arsyad (2000), model untuk memprediksi erosi dari bidang tanah menggunakan *The Universal Soil Loss Equation* (USLE). Persamaan USLE adalah sebagai berikut :

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \dots\dots\dots(1)$$

Dimana :

- A = banyaknya tanah tererosi dalam ton/hektar/tahun
- R = faktor curah hujan dan aliran permukaan/erosivitas hujan
- K = faktor erodibilitas tanah
- L = faktor panjang lereng
- S = faktor kecuraman lereng
- C = faktor vegetasi penutup tanah dan pengolahan tanaman
- P = faktor teknik konservasi yang dipakai

Berdasarkan persamaan USLE maka dilakukan *overlay* menggunakan *software* ArcView GIS 3.3. Peta-peta dasar R, K, L, S, C, dan P dalam bentuk *shapefile* (SHP) dilakukan *overlay* untuk memprediksi erosi.

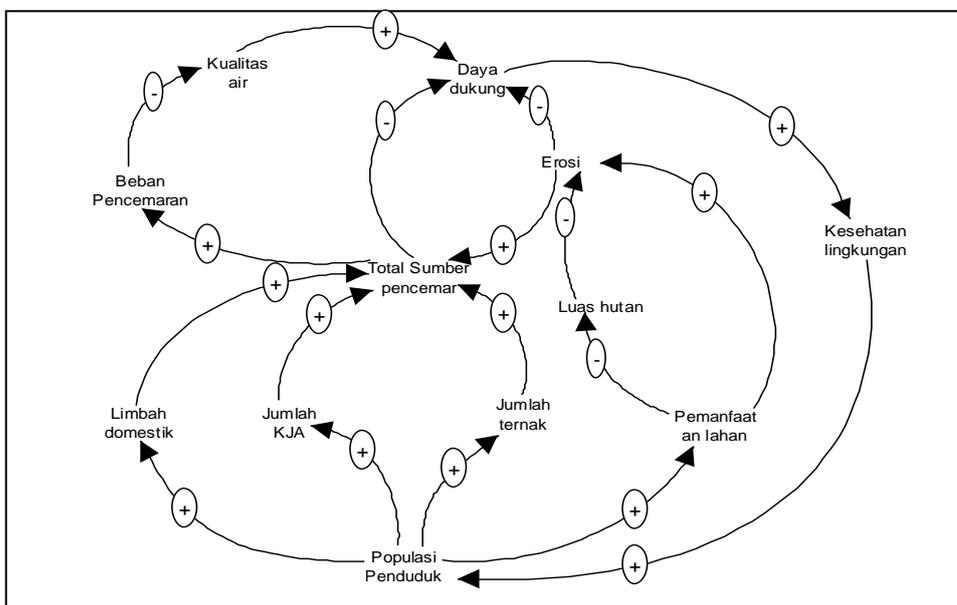
### Diagram Sebab Akibat Model Dinamik Pengaruh Pertumbuhan Penduduk Terhadap Pencemaran

Variabel yang berpengaruh adalah penduduk yang disebut sebagai faktor pengungkit. Bertambahnya jumlah penduduk maka akan meningkatkan faktor sosial ekonomi seperti

kemiskinan, kesejahteraan, pendidikan, dan perilaku masyarakat.

Meningkatnya angka kemiskinan mendorong masyarakat meningkatkan penebangan hutan secara liar, selain itu rendahnya pendidikan dan perilaku masyarakat akan meningkatkan perambahan hutan secara liar. Meningkatnya perambahan hutan akan meningkatkan erosi yang pada akhirnya meningkatkan pendangkalan danau.

Meningkatnya pertumbuhan penduduk akan meningkatkan penggunaan lahan baik lahan pertanian dan permukiman serta meningkatkan penebangan hutan. Meningkatnya penggunaan lahan dapat menurunkan luas hutan. Peningkatan jumlah penduduk berdampak pada peningkatan jumlah usaha, seperti karamba jaring apung (KJA), peternakan, hotel, restoran, akan meningkatkan pendapatan. Sebaliknya, meningkatnya usaha dapat memperkecil daya dukung Danau Sentani, seperti digambarkan secara lengkap pada diagram sebab akibat (*causal loop diagram*) pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Diagram Sebab Akibat Model Dinamik Pengaruh Pertumbuhan Penduduk terhadap Pencemaran.

### Uji Validasi dan Sensivitasi Model

Tahap-tahap uji validasi yang dilakukan adalah uji validasi kinerja dan uji sensitivitas.

### 1. Uji validasi kinerja

Uji validasi kinerja yang digunakan adalah Statistik *Absolute Mean Error* (AME) dan *Absolute Variation Error* (AVE). Nilai batas penyimpangan yang dapat diterima adalah 5–10%. Selain itu digunakan pula uji Kalman Filter (KF), dengan tingkat *fitting* (kecocokan) yang dapat diterima 47,5–52,5% (Barlas 1996 dalam Kholil, 2005). Uji lainnya adalah uji Durbin Watson (DW), yaitu tajam sekali  $DW > 2$  dan kurang tajam  $DW < 2$ .

### 2. Uji Sensitivitas

Uji sensitivitas meliputi uji intervensi fungsional dan intervensi struktural. Intervensi fungsional, yakni dengan memberikan fungsi–fungsi khusus terhadap model (Davidesen, 1994 dalam Kholil, 2005). Sedangkan intervensi struktural, yakni dengan mempengaruhi hubungan antar unsur atau struktur model dengan cara mengubah struktur modelnya.

### Analisis Kebijakan

Dua tahap analisis kebijakan yang digunakan yaitu, pengembangan kebijakan alternatif dan analisis kebijakan alternatif (Muhamadi, 2001).

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### Erosi

Pola penutupan vegetasi dan penggunaan lahan di wilayah DAS Sentani meliputi hutan, rawa, lahan kritis, semak belukar, kebun campuran, permukiman, dan danau. Berdasarkan persamaan USLE diperoleh erosi lahan permukiman sebesar 99795 ton/tahun dan erosi lahan pertanian sebesar 1399444 ton/tahun pada tahun 2007. Erosi di DAS Sentani cenderung meningkat setiap tahun. Hal ini disebabkan oleh penebangan hutan ilegal, perkebunan, perladangan (berpindah), sistem usaha tani yang masih sederhana, pengolahan lahan yang tidak memperhatikan teknik konservasi yang tepat, dan berbagai kegiatan pembangunan lainnya (BPDAS, 2005). Eksploitasi hutan dan pembukaan lahan untuk perkebunan (pertanian)

merupakan penyumbang terbesar erosi di DAS Sentani.

### Model Dinamik

Model dinamik yang dirancang meliputi: submodel dinamik sumber pencemar dan submodel dinamik penduduk sekitar Danau Sentani. Simulasi dilakukan selama periode waktu 30 tahun dimulai 2002–2032, skenario modelnya adalah :

1) Kebijakan penurunan fraksi pertambahan jumlah penduduk dan dampaknya pada penurunan jumlah limbah yaitu limbah KJA, ternak babi dan sapi, tinja manusia, dan sampah, serta berpengaruh pada penurunan erosi permukiman serta erosi pertanian dan total sumber pencemar. Kebijakan penurunan jumlah KJA, luas permukiman, luas pertanian, jumlah sapi, dan jumlah babi serta dampaknya terhadap penurunan jumlah limbah dan erosi.

Pemodelan diartikan sebagai suatu gugus pembuatan model yang akan menggambarkan sistem yang dikaji (Eriyatno, 1999). Pemodelan sistem dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* program *Powersim* versi 2.5 d.

### Model Sumber Pencemar

Model sumber Pencemar tersusun oleh beberapa sub-sub model limbah, yaitu: sub-sub model KJA, limbah peternakan sapi, limbah peternakan babi, erosi lahan pertanian, erosi lahan permukiman, limbah tinja permukiman danau, dan sub model sampah. Ketujuh sub model tersebut dibuat secara parsial berdasarkan persamaan yang sesuai dengan masing-masing submodel, kemudian diintegrasikan menjadi satu model sumber pencemaran perairan di Danau Sentani. Penggabungan ketujuh submodel tersebut merupakan gambaran total sumber pencemaran yang masuk ke perairan Danau Sentani dalam hubungannya sebagai penyumbang terhadap beban pencemar danau.

Model dinamik sumber pencemar Danau Sentani ditunjukkan pada Gambar 6. Model dinamik sumber pencemar dari luar dan dalam Danau Sentani dibangun berdasarkan persamaan 5, 6, 7, 8, dan 9.

**Validitas Kinerja (Output Model)**

Validasi kinerja model merupakan pengujian sejauh mana kinerja model yang dibangun (*output model*) sesuai dengan kinerja sistem nyata, sehingga memenuhi syarat sebagai model ilmiah yang taat fakta atau diterima secara akademik. Validasi kinerja terhadap sub model sumber pencemar untuk variabel jumlah penduduk dengan menggunakan rumus AME, AVE, KF, dan DW diperoleh nilai masing-masing 0,0101 (1,01%); 0,082 (8,2%); 0,457 (45,7%); dan 0,000329, dengan demikian nilai-nilai AME dan AVE tersebut berada pada batas (5-10%) dan 47,5-52,5% untuk KF serta DW < 2 menunjukkan pola fluktuasi kurang tajam.

Sedangkan, hasil pengujian validasi kinerja pada sub model sumber pencemar untuk variabel total sumber pencemar dengan menggunakan rumus AME, AVE, KF dan DW diperoleh nilai masing-masing 0,067 (6,7%), 0,047 (4,7%), 0,476 (47,6%), dan 0,0304, dengan demikian nilai-nilai AME dan AVE tersebut berada pada batas (5-10%) dan 47,5-52,5% untuk KF serta DW < 2 menunjukkan pola fluktuasi kurang tajam.

**Verifikasi Model**

Verifikasi model dilakukan untuk mengetahui perilaku sistem model, sehingga dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan bagi pengambil kebijakan untuk melakukan langkah-langkah strategis berkaitan dengan pengelolaan Danau Sentani. Berdasarkan hasil simulasi (Gambar 5, 6, 7), meningkatnya jumlah penduduk diikuti oleh peningkatan luas penggunaan lahan, erosi, dan jumlah limbah.

$$TSP = LKJA + LSH + LTM + LPM + LPT + LSI + LB \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{d(TSP)}{dt} = +C(t) \dots\dots\dots(6)$$

$$TSP = + \int_{t=2002}^{t=n} C(t)dt \dots\dots\dots(7)$$

$$TSP = \int_{t=2002}^{t=n} C1(t)dt + \int_{t=2002}^{t=n} C2(t)dt + \int_{t=2002}^{t=n} C3(t)dt + \int_{t=2002}^{t=n} C4(t)dt + \int_{t=2002}^{t=n} C5(t)dt + \int_{t=2002}^{t=n} C6(t)dt + \int_{t=2002}^{t=n} C7(t)dt \dots\dots(8)$$

Dalam model dinamik sederhana persamaan 8 ditulis menjadi :

$$TSP = (JLKJA * fk1) + (JLSH * fk2) + (JLTM * fk3) + (JLPM * fk4) + (JLPT * fk5) + (JLSI * fk6) + (JLB * fk7) \dots\dots\dots(9)$$

Keterangan :

- TSP = Total sumber pencemar,
- LSH = Limbah Sampah,
- LPM = Limbah permukiman,
- LSI = Limbah tinja sapi,
- C (t) = total sumber pencemar per tahun

- LKJA = Limbah Karamba jaring apung
- LTM = Limbah tinja manusia
- LPT = Limbah pertanian
- LB = Limbah tinja babi

Hasil simulasi terhadap submodel dinamik sumber pencemar memperlihatkan bahwa

peningkatan jumlah penduduk diikuti oleh peningkatan total beban sumber sampah

dan erosi secara eksponensial. Penelitian ini memperkuat simpulan Mustafa *et al.* (2008) dan Dahuri (2003) yang menyatakan bahwa faktor sumber pencemar perairan adalah limbah domestik perkotaan, limbah cair perkotaan, limbah cair permukiman, pertambangan, limbah industri, limbah pertanian, limbah perikanan budidaya, dan air limbah pelayaran.

Dalam simulasi selama 30 tahun sejak 2002–2032, terlihat bahwa bila tidak ada intervensi kebijakan misalnya dengan pembatasan pertumbuhan penduduk, maka hasil simulasi menunjukkan terjadi pertumbuhan yang pesat selama periode tersebut. Apabila tidak ada upaya penurunan jumlah penduduk, maka pertumbuhan penduduk yang terus meningkat tersebut akan menyebabkan kondisi *overshoot* yang merugikan bagi kehidupan manusia. Peningkatan jumlah penduduk akhirnya menemui masalah dalam penanganan limbah dan erosi. Hal ini memberikan petunjuk bahwa permasalahan limbah dan erosi memiliki bentuk struktur *Archetype Tragedy of the Commons*. Artinya, ada banyak banyak pelaku yang berlomba tapi akhirnya menemui masalah. Fraksi pertumbuhan jumlah penduduk selama ini adalah 3,27%. Penurunan fraksi pertumbuhan jumlah penduduk dari 3,27% menjadi 2% meskipun memberikan pengaruh penurunan yang nyata terhadap *level (stock)* dan laju (*rate*), namun tidak mengubah perilaku pola pertumbuhan penduduk (Gambar 2). Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan penurunan fraksi pertumbuhan jumlah penduduk ternyata dapat menurunkan jumlah penduduk dari 114.752 jiwa menjadi 79.276 jiwa pada tahun 2032.

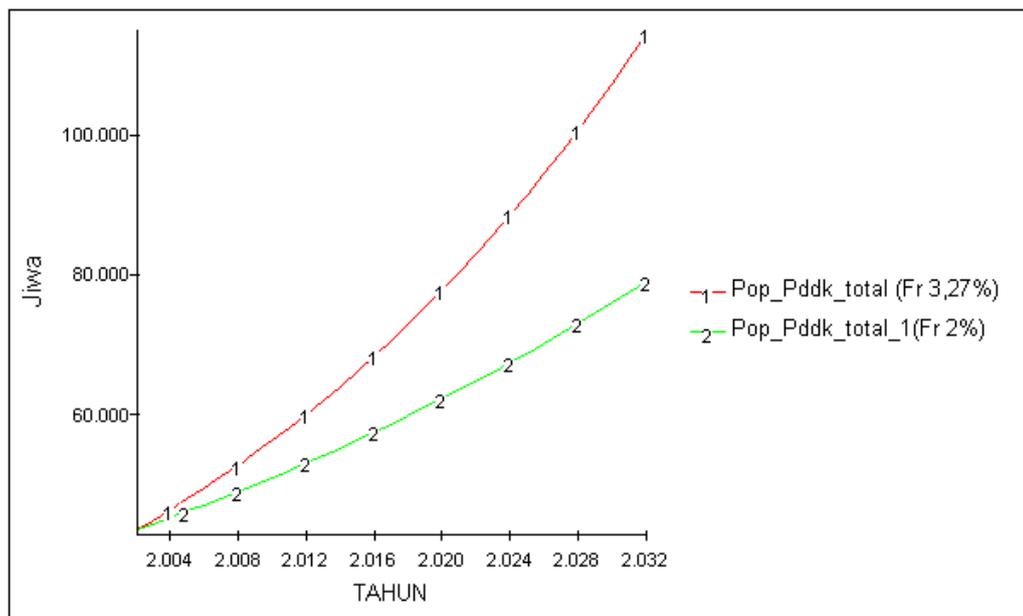
Analisis kecenderungan sistem ditujukan untuk mengeksplorasi perilaku sistem dalam jangka panjang ke depan, melalui simulasi model. Perilaku simulasi ditetapkan selama 30 tahun, yakni dimulai tahun 2002 sampai dengan 2032. Dalam kurun waktu simulasi tersebut, diungkapkan perkembangan yang

mungkin terjadi pada peubah-peubah yang dikaji. Peubah-peubah model yang akan disimulasikan adalah jumlah limbah KJA, limbah tinja sapi, limbah tinja babi, erosi pertanian, erosi permukiman, limbah tinja pemukiman danau dan sampah. Hasil simulasi model menunjukkan bahwa jumlah penduduk di sekitar perairan danau terus meningkat dari 43.766 jiwa pada awal simulasi menjadi 114.752 jiwa pada akhir tahun simulasi. Pola peningkatan jumlah penduduk diikuti pula oleh jumlah limbah yang dihasilkan. Pada awal simulasi jumlah limbah sampah 39.936,48 ton/tahun meningkat menjadi 104.711,41 ton/tahun.

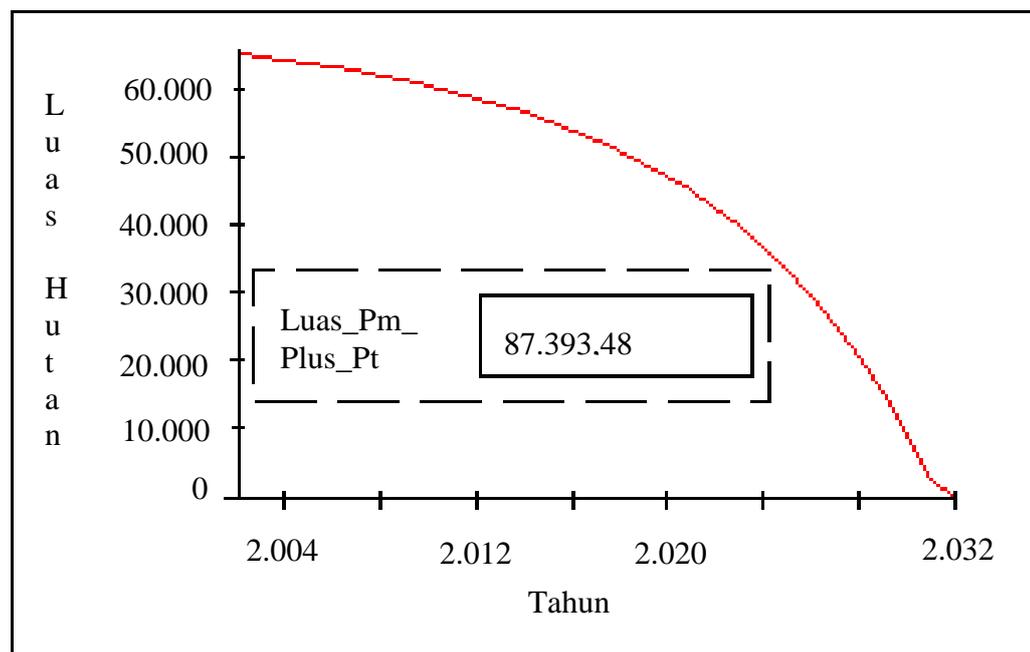
Jumlah limbah KJA pada awal simulasi 72,85 ton meningkat menjadi 1.682,54 ton pada akhir simulasi. Jumlah limbah ternak sapi pada awal simulasi 9.449,08 ton meningkat menjadi 1.151.850,32 ton. Jumlah limbah tinja penduduk pada awal simulasi 432,29 ton meningkat menjadi 3.484,95 ton. Erosi permukiman meningkat dari 9.506,26 ton menjadi 25419,89 ton. Erosi pertanian meningkat dari 63462,01 ton menjadi 12.724.070.271 ton. Limbah babi meningkat dari 4150,28 ton menjadi 297.930,25 ton.

Total luas permukiman dan luas pertanian meningkat dari 4.622,21 ha menjadi 87.393,48 Ha pada tahun 2032. Luas hutan pada awal simulasi adalah 65.865 ha. Selisih antara total luas permukiman dan pertanian (87.393,48 ha) dengan luas hutan akhir simulasi adalah 21528,48 ha. Kondisi ini menunjukkan bahwa penduduk telah menggunakan lahan di luar DPS Sentani untuk permukiman dan pertanian atau sebagian telah menempati Danau Sentani sebagai tempat permukiman sekaligus menjadi nelayan atau pembudidaya KJA (Gambar 3).





Gambar 2. Pertumbuhan Jumlah Penduduk Berdasarkan Perbedaan Laju Pertambahan Penduduk



Gambar 3. Perkembangan Luas Hutan di DAS Sentani

Kondisi ini semakin memperburuk kualitas air Danau Sentani karena meningkatnya lim-

bah KJA dan limbah tinja manusia. Dalam pemanfaatan danau Sentani dan pemanfaatan lahan untuk permukiman dan pertanian akhirnya menemui masalah limbah dan menipisnya

keterbatasan ketersediaan lahan (Gambar 3). Hal ini memberikan petunjuk bahwa pemanfaatan lahan memiliki bentuk struktur *Archetype Limit to Success* dan *Tragedy of the Commons* (Kim dan Anderson, 1998).

### Analisis Kebijakan

Analisis kebijakan adalah pengetahuan tentang cara-cara yang strategis dalam mempengaruhi sistem untuk mencapai tujuan yang diinginkan (Muhamadi, 2001). Analisis kebijakan ini dilakukan dengan melakukan intervensi fungsional dan intervensi struktural. Pertama-tama dilakukan intervensi fungsional terhadap parameter penduduk yaitu dengan kebijakan menurunkan fraksi pertambahan jumlah penduduk dari 3,27 % menjadi 2 %. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penurunan fraksi pertumbuhan jumlah penduduk dapat menurunkan jumlah sampah dari 104.711,41 ton menjadi 72.394,40 ton pada tahun 2032. Penelitian ini memperkuat simpulan Kholil (2005), bahwa upaya penurunan produksi sampah akan dapat berhasil secara efektif bila kebijakan yang ditempuh adalah dengan mengurangi pertumbuhan penduduk. Secara teknis penurunan fraksi pertambahan jumlah penduduk dapat ditempuh melalui beberapa kebijakan misalnya pembatasan usia nikah, dan sosialisasi program KB secara besar-besaran. Pertambahan penduduk merupakan faktor pengungkit (*leverage factor*). Hal ini memperkuat simpulan Neto *et al.* (2006) pertambahan populasi dan perkembangan industri sejalan dengan meningkatnya pencemaran air dan degradasi lingkungan. Pandangan pesimis digagas oleh Thomas Malthus dengan teorinya yang terkenal, yaitu bahwa jumlah penduduk dunia akan meningkat menurut deret ukur, sedangkan persediaan makanan hanya meningkat menurut deret hitung (Elizabeth 2008 dan Soerjani *et al.*, 2008). Hal ini menunjukkan bahwa pertambahan jumlah penduduk meningkat secara cepat dibanding kebutuhan pangan. Oleh sebab itu perlu dilakukan intervensi fungsional.

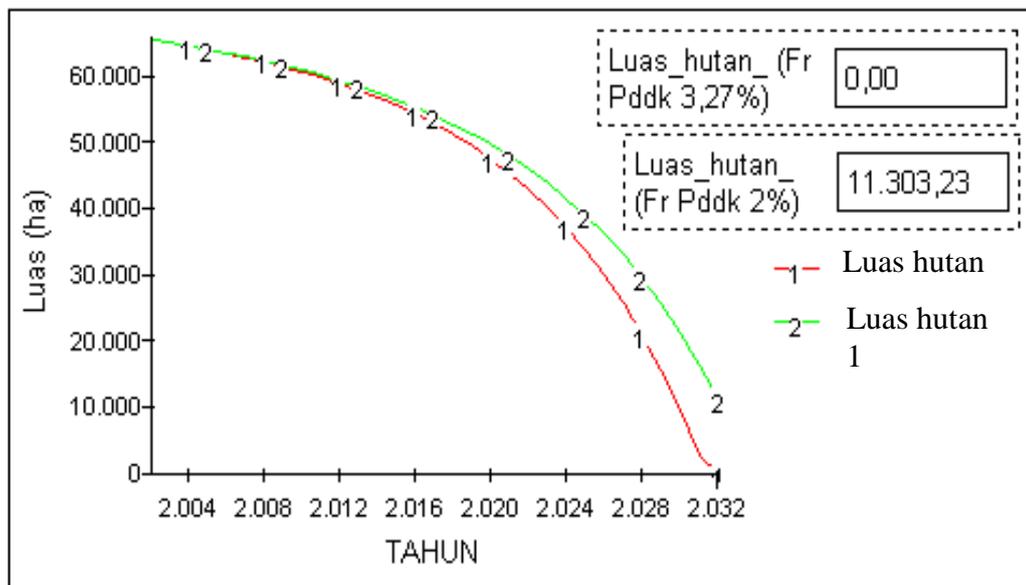
Kebijakan penurunan fraksi pertambahan jumlah penduduk berdampak pada perlambatan habisnya ketersediaan lahan hutan, sehingga pada tahun 2032 lahan hutan masih tersisa 11.303,23 Ha. Apabila tanpa intervensi fungsional maka luas hutan akan habis (0 Ha) pada akhir simulasi tersebut (Gambar 4). Jika luas hutan dan permukiman dijumlahkan, maka kebijakan penurunan fraksi pertambahan jumlah penduduk berdampak pada penurunan total luas permukiman dan pertanian. Pada akhir simulasi total luas permukiman dan pertanian berkurang dari 87.393,48 Ha menjadi 60.375,38 Ha (Gambar 4 dan 5).

Dampak dari kebijakan penurunan fraksi pertambahan jumlah penduduk adalah terjadi penurunan luas lahan terpakai, baik lahan permukiman maupun lahan pertanian dan akhirnya berpengaruh pada penurunan erosi permukiman serta erosi pertanian. Pada akhir simulasi luas permukiman berkurang dari 73.171,75 Ha menjadi 50.550,37 Ha dan luas lahan pertanian yang terpakai berkurang dari 14.221,73 Ha menjadi 9.825,01 Ha. Pada akhir simulasi erosi permukiman berkurang dari 1,27241e10 ton menjadi 8,790366e9 ton dan erosi pertanian berkurang dari 1,85498e12 ton menjadi 1,2815e12 ton.

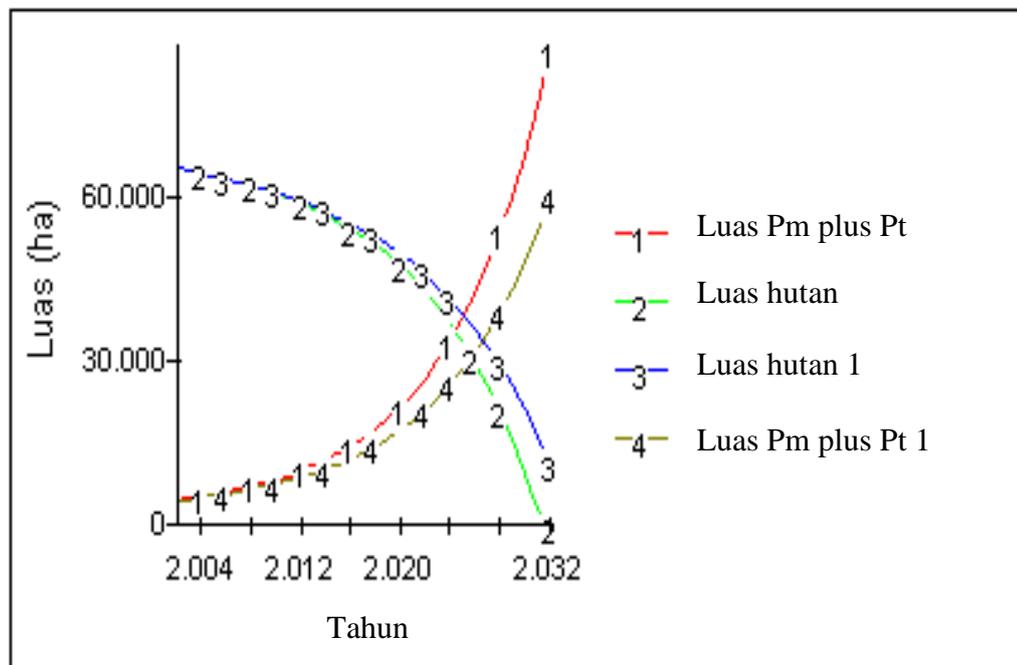
Hasil simulasi menunjukkan bahwa kebijakan penurunan fraksi pertambahan jumlah penduduk ternyata berdampak pada penurunan jumlah limbah KJA, limbah ternak babi, limbah ternak sapi, limbah feses manusia, sampah, serta berpengaruh pada penurunan erosi permukiman dan pertanian. Demikian pula jumlah limbah KJA berkurang dari 592,77 ton menjadi 487,08 ton, limbah babi berkurang dari 297.930,25 ton menjadi 205.823,75 ton, limbah ternak sapi berkurang dari 1.151.850 ton menjadi

795.750,52 ton, limbah tinja penduduk berkurang dari 4.903,21 ton menjadi 3.429,67 ton, jumlah sampah berkurang dari 104.711,41 ton menjadi 72.339,40 ton, serta erosi permukiman berkurang dari 1,27241e10 ton menjadi 8,790366e9 ton dan erosi pertanian berkurang dari

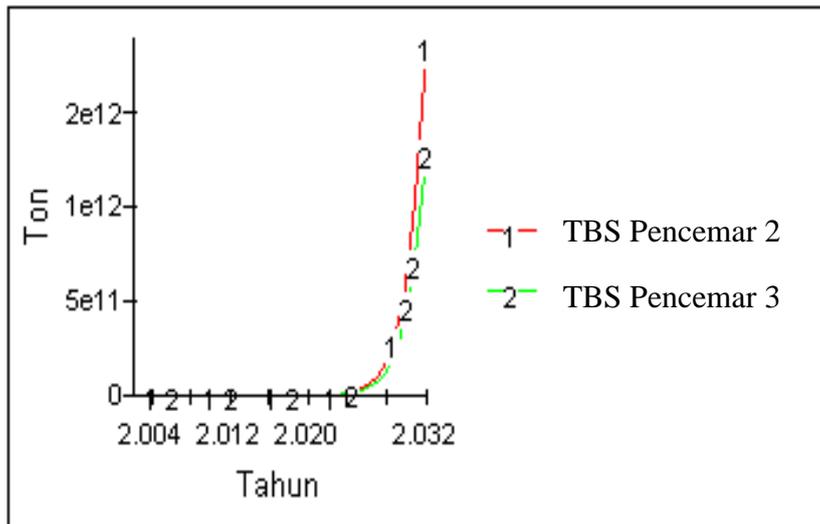
1,85498e12 ton menjadi 1,2815e12 ton pada akhir simulasi. Total sumber pencemar adalah penjumlahan dari jumlah masing-masing limbah dan erosi. Pada akhir simulasi total sumber pencemar berkurang dari 1,8677e12 ha menjadi 1,29029e12 Ha (Gambar 6).



Gambar 4. Penurunan Luas Hutan Berdasarkan Perbedaan Laju Pertambahan Penduduk



**Gambar 5.** Penurunan Total Luas Hutan dan Permukiman Berdasarkan Perbedaan Laju Pertumbuhan Penduduk.



**Gambar 6.** Kenaikan Total Sumber Pencemar Berdasarkan Intervensi Laju Pertumbuhan Penduduk

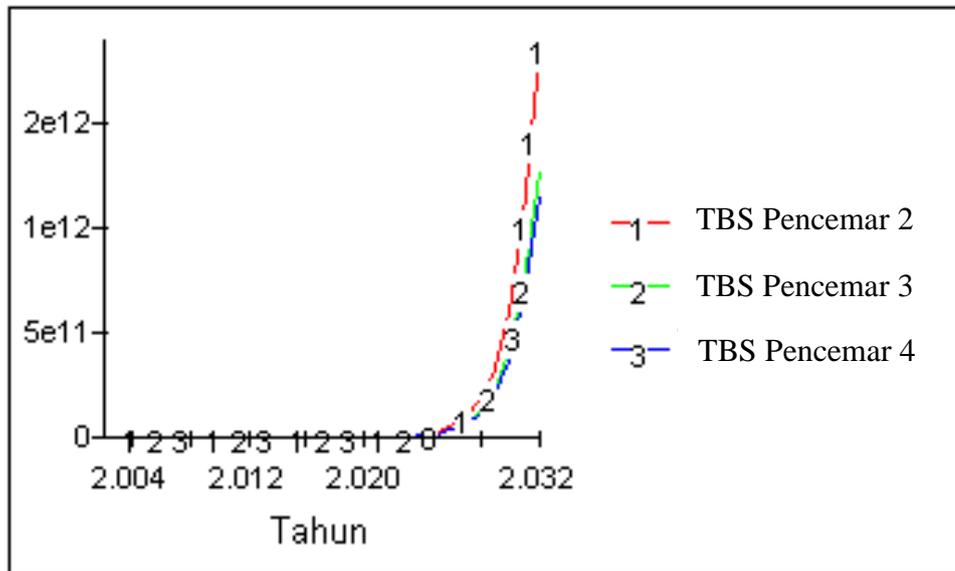
Secara bersama-sama perlu juga dilakukan kebijakan intervensi dalam bentuk intervensi struktural terhadap jumlah jumlah KJA, luas permukiman, luas pertanian, jumlah sapi, dan jumlah babi. Untuk menekan berkurangnya jumlah sampah maka perlu diadakan sosialisasi guna meningkatkan partisipasi masyarakat. Sedangkan untuk menekan pertumbuhan pemukiman danau maka perlu penegakan regulasi berkaitan dengan permukiman di sempadan dan di sekitar danau. Intervensi struktural dilakukan dengan menggunakan fungsi STEP, yaitu dengan cara menurunkan jumlah KJA, luas permukiman, luas pertanian, jumlah sapi, dan jumlah babi masing-masing sebesar 10 %. Hasil simulasi model setelah dilakukan intervensi struktural menunjukkan total sumber pencemar berkurang dari 1,29029e12 ton menjadi 1,16126e12 ton pada akhir simulasi. Upaya pemecahan masalah tanpa diduga memiliki dampak buruk terhadap sektor lain, seperti intervensi menurunkan jumlah KJA, luas pertanian, jumlah sapi, dan jumlah babi dapat berdampak buruk terhadap kehidupan atau ekonomi penduduk, hal ini memberikan petunjuk bahwa upaya pemecahan masalah melalui intervensi STEP tersebut mengikuti bentuk struktur *Archetype Shifting*

*the Burden* (Kim *et al.* 1998). Perbandingan hasil simulasi model antara tanpa intervensi, intervensi fungsional (menurunkan fraksi pertumbuhan penduduk 2%), dan intervensi struktural (menurunkan sumber pencemar 10%) masing-masing adalah : 1,8677e12 ton, 1,29029e12 ton dan 1,16126e12 ton (Gambar 7). Ternyata intervensi struktural tidak berpengaruh nyata dalam menurunkan total sumber pencemar, hal ini berarti juga tidak berpengaruh nyata terhadap beban pencemaran dan kapasitas asimilasi.

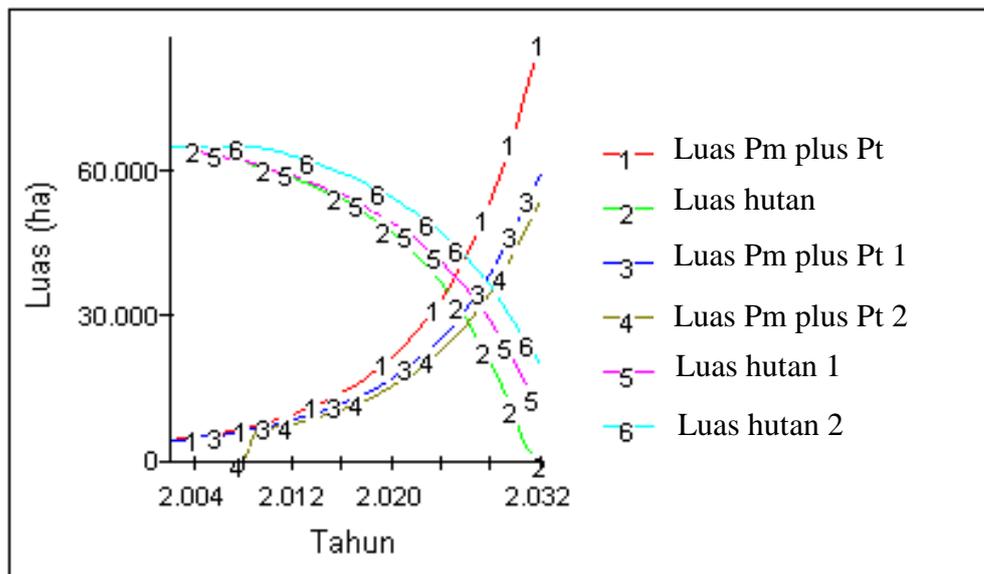
Hasil simulasi model setelah dilakukan intervensi struktural melalui fungsi STEP dengan cara menurunkan luas permukiman dan luas pertanian sebesar 10 % yang dimulai pada tahun 2009, ternyata tidak berpengaruh nyata terhadap waktu habisnya luas hutan (0 Ha). Jika tanpa intervensi ternyata luas hutan habis terpakai pada tahun 2032, dengan intervensi fungsional menurunkan fraksi pertumbuhan penduduk 10 % maka luas hutan habis terpakai pada tahun 2034, dan dengan intervensi struktural menurunkan luas permukiman dan pertanian 10 % ternyata luas hutan habis pada tahun 2036. Jika dibandingkan hasil simulasi antara tanpa intervensi, intervensi fungsional

dan intervensi struktural maka sisa luas hutan pada tahun 2032 berturut-turut sisanya adalah 0 Ha, 11.303,23 Ha, dan 20.277,11 Ha.

Seiring dengan penurunan total luas permukiman dan pertanian maka mengakibatkan menurunnya luas hutan (Gambar 8).



**Gambar 7.** Kenaikan Total Sumber Pencemar Berdasarkan Intervensi Fungsional dan Struktural



**Gambar 8.** Hubungan Penurunan Total Luas Permukiman dan Pertanian terhadap Luas Hutan Berdasarkan Intervensi dan Tanpa Intervensi

#### 4. KESIMPULAN

Pendekatan model dinamik untuk pengelolaan dan perencanaan wilayah permukiman dan pertanian di sekitar Danau Sentani dapat membantu untuk mengetahui perkembangan sumber-sumber pencemar, erosi, dan batas

waktu habisnya luas hutan, sehingga kebijakan strategis berkaitan dengan degra-dasi DAS Sentani dapat diantisipasi secara lebih dini. Submodel penduduk dan submodel sumber pencemar dapat digunakan sebagai

alternatif dalam penanganan sampah, erosi lahan per-mukiman, dan erosi lahan pertanian. Pertumbuhan penduduk merupakan faktor pengungkit (*leverage factor*) terhadap pening-katan sumber pencemar, keterbatasan lahan hutan, erosi lahan permukiman, dan erosi lahan pertanian. Upaya pengurangan total sumber pencemar yang lebih besar adalah melalui intervensi fungsional dengan cara penurunan fraksi pertumbuhan penduduk. Namun secara bersama-sama perlu juga dilakukan intervensi struktural terhadap luas lahan permukiman, dan luas lahan pertanian. Model dinamik sumber pencemar merupakan bentuk *Archetype Shifting the Burden*.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Arsyad, S. 2000. *Konservasi Tanah dan Air*. IPB Press. Bogor.
- BP DAS. 2005. *Rencana Teknik Lapangan Rehabilitasi dan Konservasi Tanah DAS Sentani*. BP DAS. Jayapura.
- Dahuri R. 2003. *Keanekaragaman Hayati Laut Aset Pembangunan Berkelanjutan Indonesia*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
- Eriyatno. 1999. *Ilmu Sistem Meningkatkan Mutu dan Efektivitas Manajemen*. IPB Press. Bogor.
- Elizabeth R. 2008. PERPU Anti penebangan Liar: Mampukah sebagai Solusi Kerusakan Hutan Dalam Mendukung Konservasi Hutan dan Mitigasi Bahaya Global Warming. *Prosiding Seminar dan Kongres Nasional MKTI VI Jakarta*. 1. 607-618.
- Kholil, 2005. *Rekayasa Model Sistem Dinamik Pengelolaan Sampah Terpadu Ber-basis Nirlimbah (Zero Waste) Studi Kasus Di Jakarta Selatan*.
- Kim, D. H. dan Anderson, V. 1998. *System Archetype Basics, From Story to Structure*. Pegasus Communication, Inc, USA.
- Muhamadi, Aminulah E., dan Soesilo B. 2001. *Analisis Sistem Dinamis*. UMJ Press, Jakarta.
- Mustafa G., M.A. Kashmiri, A. Shahzad, M. W. Mumtaz, and M. Arshad, 2008. Estimation of Pollution Load at Critical Points in Stream Water Using Various Analytical Methods. *J. Applied Environmental Sciences* 3:97–105.
- Neto A., C., L. F. L. Legey, M. C. G. Araya and S. Jablonski. 2006. A System Dynamics Model for the Environmental Management of the Sepetiba Bay Watershed, Brazil. *J. Environmental Management*. 38. 879–888.
- PU 2007. *Master Plan dan Detail Desain Operasi dan Pemeliharaan Danau Sentani*. PU. Jayapura.
- Soerjani, M., R. Ahmad dan R. Munir. 2008. *Lingkungan: Sumberdaya Alam dan Kependudukan Dalam Pembangunan*. Universitas Indonesia, Jakarta.