

MODEL SISTEM DINAMIK UNTUK KEBERLANJUTAN DANAU BATUR, BATUR UNESCO GLOBAL GEOPARK, BALI

I Putu Wira Utama^{1*)}, I Wayan Arthana²⁾, I Wayan Nuarsa²⁾,
Agung Suryawan Wiranatha³⁾

¹⁾Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Provinsi Bali, Bali, Indonesia

²⁾Fakultas Kelautan dan Perikanan Universitas Udayana, Bali, Indonesia

³⁾Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Udayana, Bali, Indonesia

*Email: wira_ajus@yahoo.com

ABSTRACT

A SYSTEM DYNAMICS MODEL FOR SUSTAINABILITY OF LAKE BATUR, BATUR UNESCO GLOBAL GEOPARK, BALI

This research aims to analyze the best scenario for conserving Lake Batur, Batur UNESCO Global Geopark (BUGG), Bali. Using the system dynamics method, key factors in the management of Lake Batur can be identified. Based on modeling results, it is known that the sustainability of Lake Batur is strongly influenced by aspects of land use, the environment, the economy, and the social culture of the community. The main leverage factors in supporting the preservation of Lake Batur are law enforcement and supervision, government assistance, as well as training and outreach to the community. The analysis of the sensitivity value of the optimistic/moderate ratio shows that the optimistic scenario is the best option to reduce the lake pollution index to 0.86 (still below the 1 threshold). Increasing community income per capita in this area in 2045 is estimated to reach Rp87.992.747,76/year, with predictions of 9,312 floating net cage plots owned by 2,592 entrepreneurs. The predicted number of plots is 14.90 ha, which is still below 1% of the area of Lake Batur.

Keywords: System Dynamics; Sustainability; Lake Batur; BUGG

1. PENDAHULUAN

Kawasan Batur UNESCO *Global Geopark* (BUGG) memiliki keanekaragaman geologi, hayati, dan budaya yang unik. Penggunaan lahan di kawasan ini didominasi oleh pertanian, pariwisata, dan pemukiman (Utama dan Adnyana, 2019). Pertanian di kawasan ini sebagian besar menggunakan sistem pertanian tradisional dengan memanfaatkan lahan kering untuk tanaman pangan dan hortikultura seperti kubis, sawi putih, sawi hijau, aneka cabai, bawang merah, tomat, buncis, timun jepang, labu siam, tanaman kopi dan tanaman jeruk Kintamani. Pasokan air

untuk mendukung aktivitas pertanian ini dipenuhi dari Danau Batur. Selain dimanfaatkan sebagai pasokan air Danau Batur juga digunakan untuk keperluan perikanan, rekreasi dan transportasi (Handayani, *et al.*, 2011; Sulawesty dan Satya, 2013; Budiasa *et al.*, 2018). Posisi geografis lahan pertanian yang lebih tinggi dari posisi danau, ditambah lagi dengan aktivitas pertanian dan pariwisata yang dekat dengan tepian danau, menimbulkan rembesan residu pupuk, pestisida dan limbah yang masuk ke dalam danau sehingga diindikasikan terjadi akumulasi zat pencemar (Kuncaka, 2004; Wijana, 2010).

Selain pertanian, pariwisata juga menjadi salah satu sektor penting di

kawasan BUGG. Tempat wisata yang terkenal di kawasan ini adalah Danau Batur, Gunung Batur, serta berbagai objek wisata alam dan budaya lainnya. Alih fungsi lahan untuk mendukung perkembangan pariwisata sudah dirasakan sejak 15 tahun yang lalu dan semakin pesat semenjak menjadi anggota *United Nation Global Geopark Network* (UNGGN), tetapi perkembangannya masih berorientasi terhadap kepentingan ekonomi semata dan belum sepenuhnya peduli terhadap permasalahan lingkungan (Handayani, *et al.*, 2011; KLH, 2011; Naningsi *et al.*, 2018; Utama *et al.*, 2018; Ernawati *et al.*, 2019). Perkembangan pertanian dan pariwisata ini dalam jangka panjang dikawatirkan menimbulkan tekanan terhadap lingkungan dan berdampak pada kelestarian perairan danau. Hal ini telah dibuktikan dari penelitian bahwa Danau Batur mengalami eutrofikasi ringan sampai sedang (Radiarta dan Sagala, 2012; Sidaningrat *et al.*, 2018). Kualitas air Danau Batur cenderung menurun berdasarkan indeks pencemaran biologi dan non biologi (Wijana, 2010). Selain eutrofikasi masalah utama di Danau Batur adalah sedimentasi, sedimentasi pada sumber daya air merupakan hasil dari erosi tanah di daerah tangkapannya. Erosi tanah berdampak pada perubahan karakteristik fisik dan kimia tanah yang menyebabkan hilangnya nutrisi pada tanah, juga berdampak pada sedimentasi serta pengayaan nutrisi pada sumber daya air (Upadhy *et al.*, 2012).

Manusia dan danau merupakan dua komponen yang saling tergantung dan saling membutuhkan (Zalewski *et al.*, 2004). Hubungan yang serasi antara manusia, ekosistem daratan dan akuatik sangat menentukan keberlanjutan keduanya (ILEC, 2003). Danau sebagai cadangan sumber daya air tawar di bumi pada umumnya memiliki ekologi yang kompleks, merupakan lingkungan yang

sensitif, yang dipengaruhi oleh faktor internal dan eksternal, diantaranya siklus hidrologi, aktivitas vulkanik, perubahan iklim serta tekanan antropogenik (Kundzewicz *et al.*, 2007; Bates *et al.*, 2008; Christenson *et al.*, 2015; Bridgewater *et al.*, 2017). Berbagai konflik kepentingan dalam dinamika penggunaan lahan di daerah tangkapan air dan pemanfaatan danau secara intensif, ditengarai mempercepat penurunan kualitas danau yang hampir terjadi di seluruh belahan dunia (EEA, 2012; Welde dan Gebremariam, 2017; Trolle *et al.*, 2019). Ancaman eutrofikasi, logam berat, sedimentasi dan salinitas merupakan masalah teratas danau di dunia, dimana dari hasil penelitian yang dilakukan pencemar tertinggi berasal dari kegiatan pertanian, modifikasi hidrologi, dan limpasan (Zalewski dan Wagner, 2000; Beaudry, 2018). Menurut FAO (2007), di negara berkembang seperti Indonesia pada umumnya memiliki permasalahan manajemen lahan dan air yang sangat kompleks. Diperlukan penanganan yang simultan dan terintegrasi dalam penanganan permasalahan tersebut. Hal ini dikarenakan sebagian besar mata pencaharian masyarakat penghuni tepian danau di negara berkembang sangat tergantung pada danau itu sendiri, seperti untuk pertanian, peternakan, penangkapan ikan dan budidaya ikan (ILEC, 2003).

Dari berbagai permasalahan tersebut maka perlu dilakukan upaya-upaya pengelolaan melalui pemodelan. Pemodelan lingkungan merupakan suatu usaha yang dibuat manusia untuk mempermudah pemahaman suatu masalah sistem lingkungan yang saling terkait dan berhubungan (Saloranta, *et al.*, 2004). Salah satu pendekatan untuk mengatasi masalah yang kian kompleks tersebut adalah *system thinking*. Konsep *system thinking* akan menghasilkan keterpaduan antar komponen melalui pemahaman secara holistik/menyeluruh dan utuh.

Konsep ini merupakan suatu alternatif pendekatan baru dalam memahami dunia nyata (Forrester, 2009). Implementasi dari konsep ini telah dikembangkan pada sistem dinamik, dimana pendekatannya dilakukan secara kuantitatif berdasarkan pada data/fenomena yang ada.

Pada penelitian ini akan digunakan metode sistem dinamik yang menjadi sebuah pendekatan dengan menyajikan model umpan balik berbasis sistem dinamik. Sistem ini mampu memecahkan permasalahan kompleks berdasarkan waktu serta memberikan wawasan tentang interaksi antara berbagai komponen sistem (Ahmad dan Simonovic, 2004; Neuwirth *et al.*, 2015). Masalah yang kompleks akan dianalisis menggunakan metode sistem dinamis sehingga diketahui pola perubahan dari berbagai variabel yang mempengaruhi dan dapat dirumuskan formulasi matematisnya. Dari analisis tersebut akan diketahui faktor kunci (*key factor*) dan selanjutnya dimodelkan untuk mengetahui pola/trend perubahan seiring perubahan waktu serta melakukan skenario di masa depan.

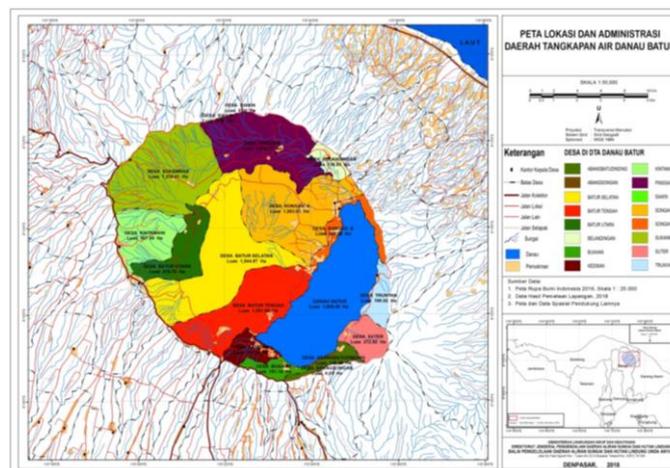
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis faktor yang mempengaruhi perubahan kawasan Danau Batur, dan mengetahui faktor pendorong utama dalam mendukung keberlanjutan Danau

Batur, serta mengetahui pilihan skenario terbaik dalam pengelolaan kawasan ini. Dari pilihan skenario hasil pemodelan diharapkan dapat dijadikan referensi dalam perumusan kebijakan pengelolaan Danau Batur ke depan, sehingga terwujud pengelolaan Danau Batur berkelanjutan demi kepentingan generasi masa kini dan yang akan datang.

2. METODOLOGI

2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini berlokasi di Daerah Tangkapan Air Danau Batur, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli, Provinsi Bali. Secara geografis terletak di 8°11'18.35" LS sampai 8°17'35.45" LS dan 115°19'16.42" BT sampai 115°25'47.45" BT yang luasnya mencapai 10.211,95 ha mencakup areal Danau Batur seluas 1.606,46 ha. Daerah Tangkapan Air Danau Batur secara administratif terdiri dari 15 Desa, yaitu Sukawana, Kintamani, Batur Utara, Batur Tengah, Batur Selatan, Kedisan, Abang Songan, Songan A, Songan B, Trunyan, Suter, Abang Batudinding, Buahon, Pinggan dan Belandingan yang masuk dalam kawasan Wingkang Ranu (Gambar 1).



Gambar 1.
Peta Lokasi Penelitian

2.2. Jenis dan Sumber Data

Data yang digunakan dalam melengkapi proses pemodelan, diperlukan data primer dan sekunder yang bersumber

dari berbagai laporan dan dokumen instansi terkait yang bersifat *time series* dan berhubungan dengan topik yang dikaji sesuai dengan Tabel 1.

Tabel 1. Jenis dan Sumber Data

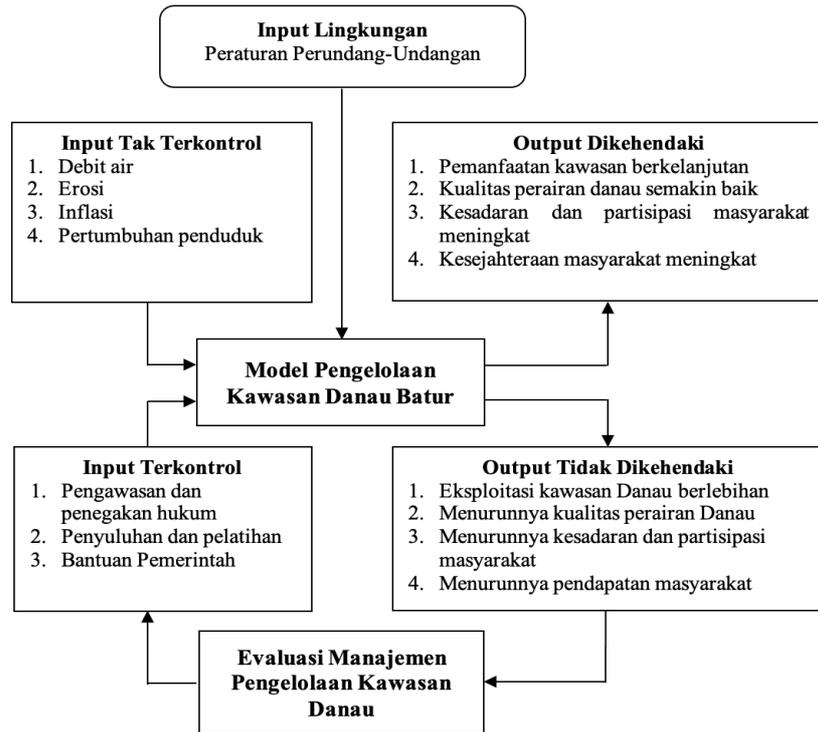
No	Jenis Data	Sumber
A	Data Primer	
1	Observasi lapangan	Lapangan
2	Penilaian dimensi lingkungan, ekonomi, sosial, infrastruktur dan teknologi serta hukum dan kelembagaan	Responden (Pakar)
3	Aktor yang berpengaruh, faktor penyebab konversi lahan, faktor pencemar danau	Responden (Pakar)
B	Data Sekunder	
1	Data penggunaan lahan dan erosi tahun 2007-2018	P3E Bali & Nusra
2	Data KJA tahun 2007-2018	DPKP Kab. Bangli
3	Data kualitas air 2007-2018	BWS Bali Penida
4	Data Sosial Ekonomi dan Budaya tahun 2007-2018	DPKP Kab. Bangli, BPS, kepala desa, petani, nelayan dan pelaku pariwisata
5	Data pengelolaan danau eksisting pada tahun 2018	DLH, Bappeda Litbang, P3E, BPDAS

2.3. Analisis Pola Perubahan dan Hubungan Antar Variabel

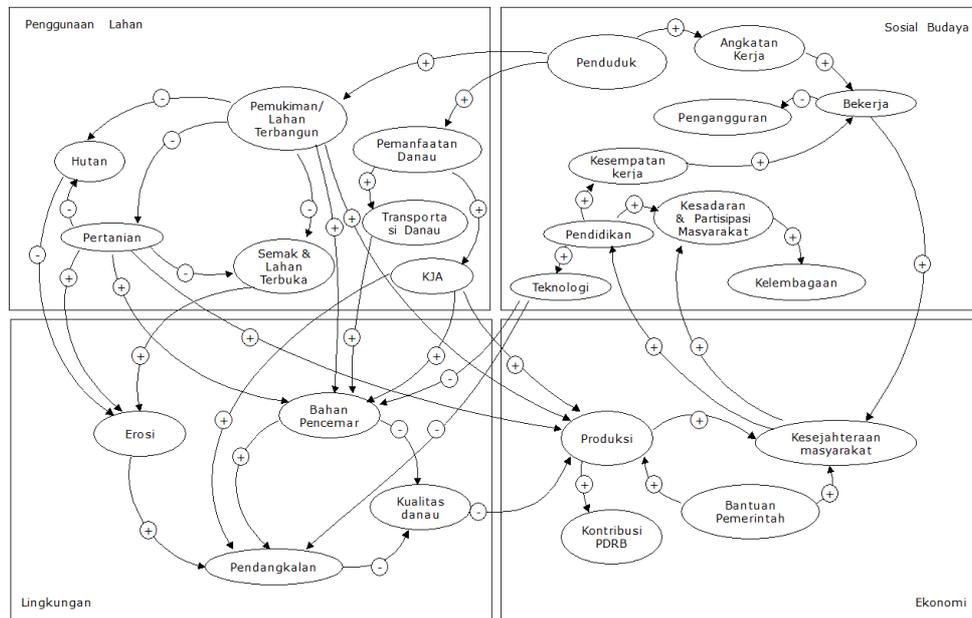
Analisis pola perubahan kawasan Danau Batur dan hubungan antar variabel di dalam sistem dilakukan melalui pendekatan sistem dinamik. Pendekatan ini digunakan untuk memformulasikan pola perubahan yang terjadi, mensimulasikan perilaku sistem dimasa yang akan datang, dan untuk mengetahui hubungan antar variabel di dalam sistem. Identifikasi permasalahan sistem sangat penting untuk mengetahui kesenjangan antara fakta atau hasil observasi dengan kondisi ideal dari sistem diamati. Permasalahan dalam sistem ini selanjutnya digunakan sebagai kendala dalam efektifitas sistem. Tahap selanjutnya adalah melakukan identifikasi

sistem dengan membuat diagram *input* dan *output* yang berguna dalam melihat struktur sistem, hubungan antar variabel, dan digambarkan dengan hubungan sebab akibat (*Causal Loop Diagram*). Secara detail diagram input dan output digambarkan pada Gambar 2.

Fungsi *causal loop* juga digunakan untuk membatasi sistem yang dikaji. CLD dibangun untuk menggambarkan pola hubungan sebab akibat yang terjadi karena pengaruh hubungan timbal balik lingkungan di area studi. Gambaran yang diperoleh dari studi ini dipetakan ke dalam 4 (empat) aspek yaitu: penggunaan lahan, lingkungan, ekonomi, dan sosial budaya. Hasil yang diperoleh selanjutnya digambarkan kedalam CLD seperti pada Gambar 3.



Gambar 2.
Diagram *Input-Output*

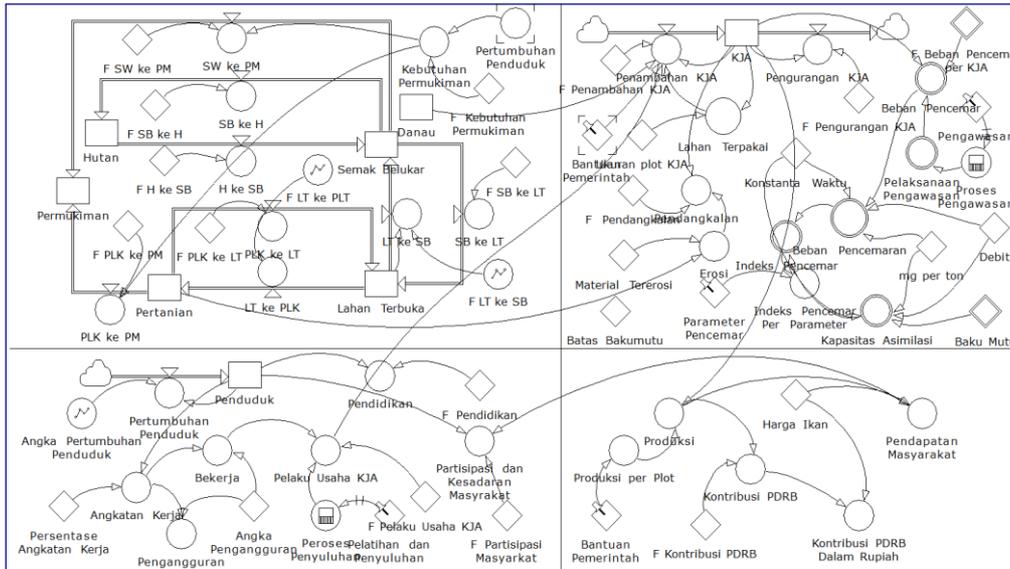


Gambar 3.
Diagram Sebab-Akibat Model Pengelolaan Danau Batur

2.4. Membangun Model Dinamik

Dalam membangun model dilakukan beberapa tahapan. Pada tahap pertama, dilakukan analisis penggunaan lahan,

lingkungan, ekonomi dan sosial budaya masyarakat. Output dari analisis ini berupa *Stok Flow Diagram (SFD)* seperti Gambar 4.



Gambar 4.
SFD Model Pengelolaan Danau Batur

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil analisis terhadap kebutuhan sistem yang dilakukan melalui FGD bersama stakeholder terkait, dapat diidentifikasi tujuan yang ingin dikehendaki seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Dari berbagai masukan terkait pengelolaan danau yang berkelanjutan disepakati yaitu: 1) pemanfaatan kawasan yang berkelanjutan, 2) kualitas perairan danau yang semakin baik, 3) kesadaran dan partisipasi masyarakat meningkat dan 4) kesejahteraan masyarakat meningkat. Berdasarkan hasil analisis kebutuhan yang telah dilakukan, maka dapat dirumuskan tiga permasalahan penting yang dapat diintervensi dan dioptimalisasi sekaligus merupakan faktor penguangkit utama dalam mendukung keberlanjutan Danau Batur, yaitu: pengawasan dan penegakan hukum, bantuan pemerintah, serta penyuluhan dan pelatihan kepada masyarakat. Ketiga hal ini selanjutnya didukung dengan analisis pola perubahan kawasan Danau Batur dan hubungan antar variabel di dalam sistem melalui pendekatan sistem dinamik. Berdasarkan CLD yang ditampilkan pada Gambar 3,

maka keberlanjutan Danau Batur kawasan BUGG sangat dipengaruhi oleh aspek penggunaan lahan, lingkungan, ekonomi, dan sosial budaya masyarakat. Sebagai penjabaran lebih rinci dari CLD, maka SFD dapat mempresentasikan hubungan antar variabel pada suatu lingkaran umpan balik yang dipengaruhi oleh waktu sehingga mampu menunjukkan hasil akumulasi yang merupakan laju aktivitas sistem tiap periode waktu (*rate*). Pada penelitian ini dilakukan dua kondisi prediksi yakni, prediksi tanpa intervensi dan prediksi dengan intervensi skenario. Hasil simulasi prediksi masa depan tanpa intervensi sering dikenal dengan *Business as Usual* (BaU), sementara dengan intervensi skenario disimulasikan pada dua skenario yaitu moderat dan optimis.

3.1 Simulasi BaU

Hasil simulasi prediksi masa depan tanpa intervensi/BaU menunjukkan apabila kawasan Danau Batur tidak dikelola dengan baik kondisinya akan semakin memprihatinkan. Hasil analisis simulasi menunjukkan alih fungsi lahan menjadi lahan pemukiman/terbangun pada tahun 2045 akan semakin masif, dimana peningkatannya menjadi 1.293,16 ha dari

346,03 ha di tahun 2015 (273,72%) atau meningkat hampir 3 kali lipat. Alih fungsi ini akan mengkonversi lahan terbuka dari 1,064,94 ha pada tahun 2015 menjadi 537,95 ha di tahun 2045 (-49,49%), pertanian lahan kering mengalami penurunan luas dari 5.013,12 ha menjadi 3.171,90 ha (-36,73%), dan hutan mengalami penurunan dari 754,49 ha pada tahun 2015 menjadi 667,16 ha di tahun 2045 (-11,58%). Alih fungsi ini jika dibiarkan tidak terkendali maka dapat berakibat pada kerusakan ekosistem di sekitar Danau Batur, penurunan kualitas air akibat erosi, dan peningkatan pencemaran limbah dari luar danau (Radiarta dan Sagala, 2012; Naningsi *et al.*, 2018; Sidaningrat *et al.*, 2018; Utama *et al.*, 2018).

Dari dalam danau sendiri peningkatan jumlah KJA pada tahun 2045 diprediksi mengalami peningkatan menjadi 6.698 plot KJA (68,13%) atau seluas 10,71 ha. Hal ini akan memberikan tekanan kepada perairan danau berupa peningkatan nilai indeks pencemaran BOD, COD, TTS dan nitrat secara berurutan naik 60,57%, 66,67%, 66,67, 71,43% pada tahun 2045. Indeks pencemaran BOD diprediksi meningkat dari 1,14 menjadi 1,91 pada tahun 2045 (67,54%). Kondisi ini akan memperparah pencemaran danau, sehingga baku mutu air danau dapat melebihi nilai ambang batas yang dipersyaratkan dalam Peraturan Gubernur Bali Nomor 16 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Lingkungan Hidup dan Kriteria Baku Mutu Kerusakan Lingkungan Hidup Bali sehingga tidak layak lagi digunakan untuk air baku, sarana rekreasi, pembudidayaan ikan, bahkan mengairi tanaman pertanian.

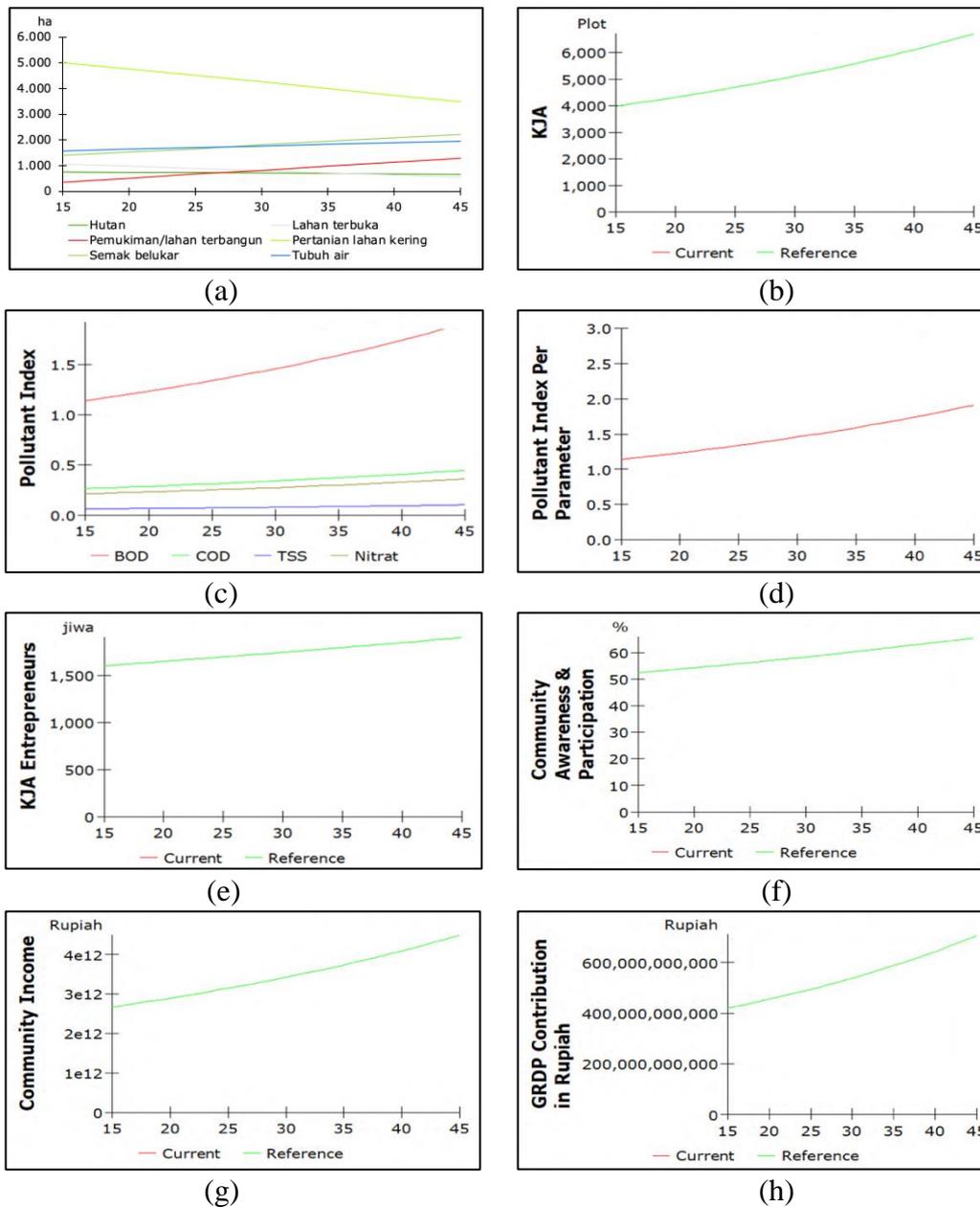
Sementara pada aspek ekonomi kesejahteraan masyarakat jika tidak dilakukan upaya-upaya strategis maka diprediksi hanya mengalami peningkatan 68,17% dengan tingkat pendapatan per kapita Rp42.198.242,00/tahun pada tahun

2045. Peningkatan pendapatan masyarakat yang minim ini akan mengakibatkan kondisi ekonomi masyarakat di kawasan Danau Batur akan semakin tertinggal dari daerah lainnya di Provinsi. Pada aspek sosial budaya peningkatan kesadaran dan partisipasi masyarakat diprediksi sedikit meningkat dari 52,42% ditahun 2015 menjadi 65,44% di tahun 2045 atau naik 13,02% selama kurun waktu 2015-2045. Secara grafik simulasi BaU ditampilkan pada Gambar 5.

3.2 Uji Validitas

Validasi perlu dilakukan agar model dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Perilaku sistem dapat dilihat dari faktor/variabel dalam model, dengan menggunakan faktor penting kuantitatif dari model dasar dan faktor penting kualitatif yang telah dikuantifikasikan. Evaluasi model dilakukan dengan membandingkan *output* dari simulasi model dan *output* yang diharapkan pada tahap identifikasi sistem. Selanjutnya, dilakukan uji sensitivitas dari proyeksi BaU yang telah diperoleh.

Validasi merupakan pengujian sejauh mana kinerja model yang dibangun sesuai dengan kinerja sistem nyata, sehingga memenuhi syarat sebagai model ilmiah yang taat fakta atau dapat diterima secara akademik. Validitas data dilakukan dengan membandingkan data hasil keluaran model dengan data empiris. Dalam penelitian ini digunakan uji *Absolute Mean Error* (AME) dan *Absolute Variation Error* (AVE). Hasil uji yang diperoleh dari kinerja masing-masing subsistem ditampilkan pada Tabel 2. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa uji validasi kinerja masing-masing sub sistem masih dapat diterima karena nilai erornya masih di bawah standar yaitu dibawah 10%.



Gambar 5.

Prediksi BaU (a) penggunaan lahan, (b) jumlah KJA, (c) tingkat pencemar, (d) indeks pencemar, (e) pengusaha KJA, (f) kesadaran dan partisipasi masyarakat, (g) pendapatan masyarakat, (h) kontribusi terhadap PDRB

Tabel 2. Uji Validitas Kinerja

No.	Sub Sistem	Jenis Validasi	Nilai	%	Hasil
1	Penggunaan Lahan	AME	0,0047	0,5%	Valid
		AVE	0,0567	5,7%	Valid
2	Lingkungan	AME	0,0372	3,7%	Valid
		AVE	0,0835	8,4%	Valid
3	Ekonomi	AME	0,0850	8,5%	Valid
		AVE	0,0825	8,3%	Valid
4	Sosial Budaya	AME	0,0865	8,6%	Valid
		AVE	0,0820	8,2%	Valid

3.3 Skenario Model

Skenario model disimulasikan dari input terkontrol hasil analisis input-output yang merupakan faktor pengungkit utama dalam mendukung keberlanjutan Danau Batur. Faktor-faktor tersebut yaitu: 1) pengawasan, 2) bantuan pemerintah, 3) pelatihan dan penyuluhan. Hasil kombinasi beberapa faktor pada berbagai

skenario akan menghasilkan perbandingan hasil simulasi. Skenario tersebut merupakan pilihan yang dapat menjadi pertimbangan kebijakan di masa depan. Adapun desain skenario simulasi model yang dilakukan pada beberapa kondisi faktor pengungkit secara detail disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Skenario kondisi

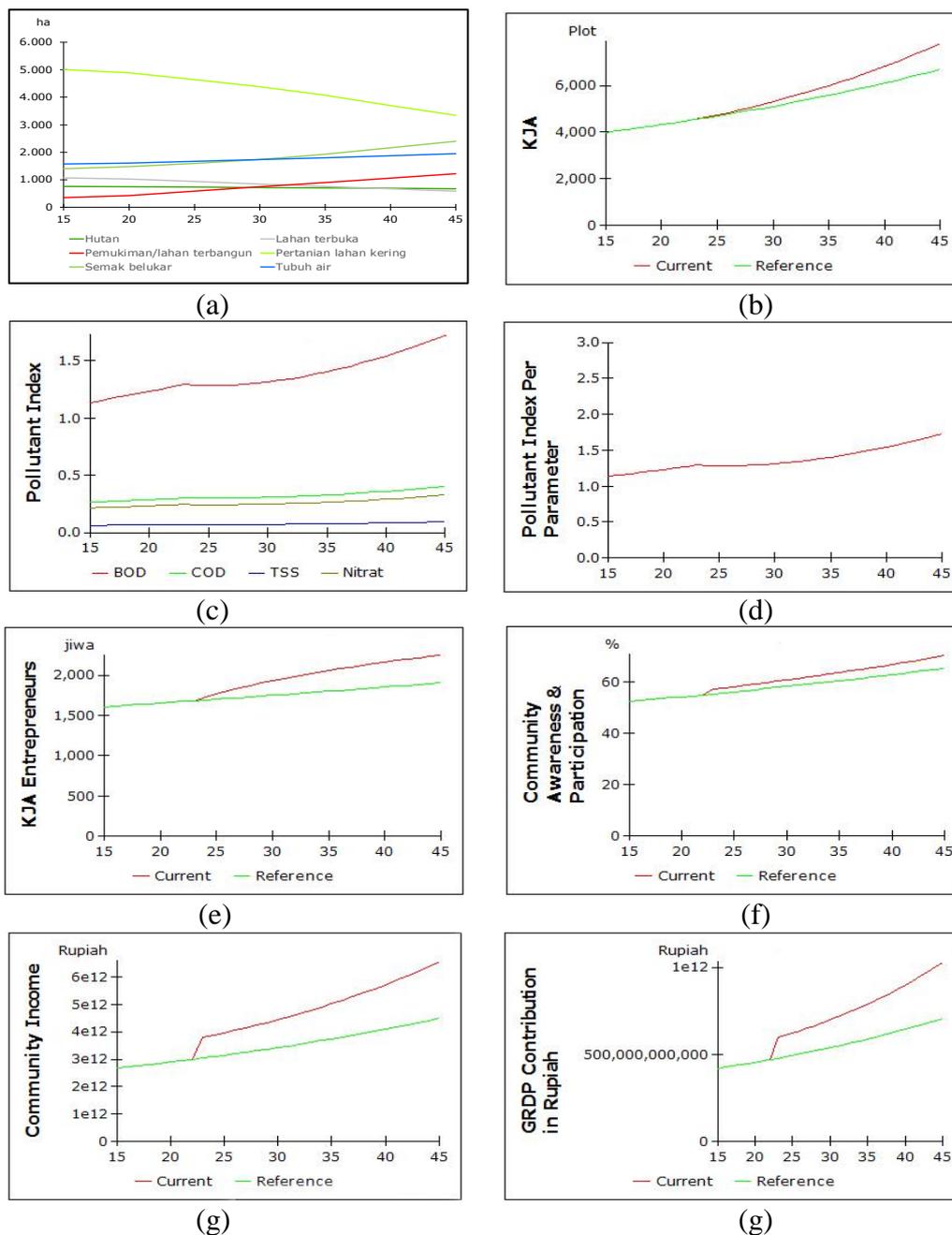
No	Intervensi	Kondisi (<i>state</i>) di masa yang akan datang	
		Moderat	Optimis
1	Pengawasan dan penegakan hukum	Optimalisasi pengawasan dan penegakan hukum penggunaan lahan, ijin usaha dan KJA, pengendalian pencemaran lingkungan ditingkatkan 62,5%	Optimalisasi pengawasan dan penegakan hukum penggunaan lahan, ijin usaha dan KJA, pengendalian pencemaran lingkungan ditingkatkan 75%.
2	Penyuluhan dan pelatihan	Peningkatan penyuluhan dan pelatihan bagi masyarakat dengan jumlah peserta meningkat sebanyak 30%	Peningkatan penyuluhan dan pelatihan bagi masyarakat dengan jumlah peserta meningkat sebanyak 40%
3	Bantuan Pemerintah	Peningkatan bantuan pemerintah sebesar 36% untuk optimalisasi pengelolaan kawasan	Peningkatan bantuan pemerintah sebesar 50% untuk optimalisasi pengelolaan kawasan

A. Skenario Moderat

Hasil simulasi dengan skenario moderat yang diintervensi pada variabel terkontrol pengawasan dan penegakan hukum ditingkatkan 62,5%, penyuluhan dan pelatihan ditingkatkan 30%, serta bantuan pemerintah ditingkatkan 36% menunjukkan bahwa, pada aspek penggunaan lahan terjadi peningkatan pada lahan terbangun menjadi 1.214,17 ha di tahun 2045 dari 346,03 ha di tahun 2015 (250,89%). Hutan mengalami penurunan dari 754,49 ha pada tahun 2015 menjadi 674,42 ha di tahun 2045 (-10,61%). Penurunan signifikan terjadi pada lahan terbuka dari 1,064,94 ha pada tahun 2015 menjadi 582,62 ha di tahun 2045 (-45,29%). Sementara peningkatan jumlah KJA diprediksi mengalami peningkatan menjadi 7.813 plot KJA atau

sekitar 12,5 ha hingga tahun 2045 dari 3.983 plot KJA atau sekitar 6,37 ha di tahun 2015 (96,16%).

Pada aspek lingkungan indeks pencemar BOD; COD; TTS; dan nitrat dapat ditekan secara berurutan menjadi 51,75%; 48,15%; 50%; 57,14% di tahun 2045. Pada aspek ekonomi peningkatan kesejahteraan masyarakat dan kontribusi terhadap PDRB diprediksi mengalami peningkatan hingga 145,18% dengan pendapatan perkapita Rp. 61.521.808,29/tahun pada tahun 2045. Pada aspek sosial budaya peningkatan kesadaran dan partisipasi masyarakat meningkat menjadi 70,47% di tahun 2045 atau meningkat 18,05%. Secara grafik skenario moderat ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 6.

Skenario moderat (a) penggunaan lahan, (b) jumlah KJA, (c) tingkat pencemar, (d) indeks pencemar, (e) pengusaha KJA, (f) kesadaran dan partisipasi masyarakat, (g) pendapatan masyarakat, (h) kontribusi terhadap PDRB

B. Skenario Optimis

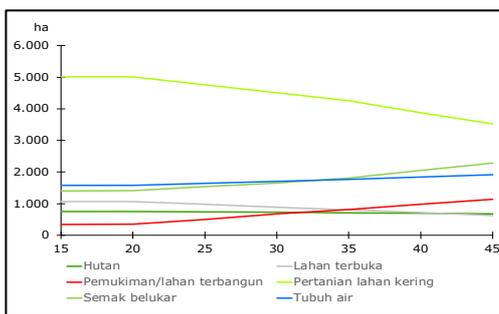
Hasil simulasi dengan skenario optimis yang diintervensi pada variabel terkontrol pengawasan dan penegakan hukum ditingkatkan 75%, penyuluhan dan pelatihan ditingkatkan 40%, serta bantuan pemerintah ditingkatkan 50% menunjukkan bahwa, pada aspek

penggunaan lahan terjadi peningkatan pada lahan terbangun menjadi 1.136,76 ha di tahun 2045 dari 346,03 ha di tahun 2015 (228,52%). Hutan mengalami penurunan dari 754,49 ha pada tahun 2015 menjadi 681,54 ha di tahun 2045 (-9,67%). Penurunan signifikan terjadi pada lahan terbuka dari 1,064,94 ha pada tahun

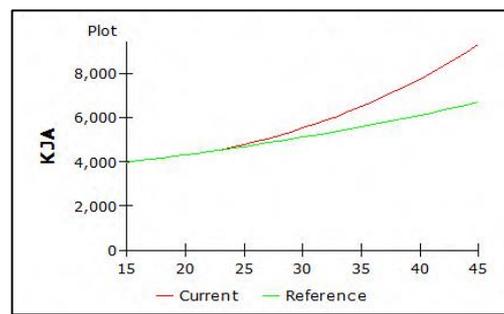
2015 menjadi 626,40 ha di tahun 2045 (-41,18%). Sementara peningkatan jumlah KJA diprediksi mengalami peningkatan menjadi 9.312 plot KJA atau sekitar 14,9 ha hingga tahun 2045 dari 3.983 plot KJA atau sekitar 6,37 ha di tahun 2015 (133,79%).

Pada aspek lingkungan BOD; COD; TTS; dan nitrat pada tahun 2045 indeks pencemarnya dapat ditekan secara berurutan menjadi 0,86 (-24,56%); 0,2 (-25,93); 0,05 (-16,67%); dan 0,16 (-

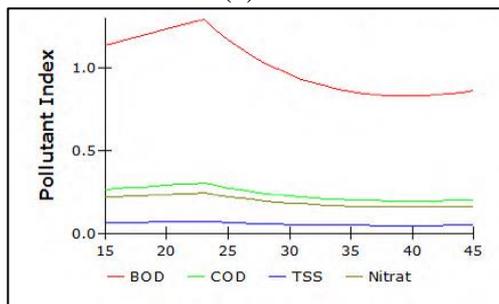
23,81%) dari tahun 2015. Pada aspek ekonomi peningkatan kesejahteraan masyarakat dan kontribusi terhadap PDRB diprediksi mengalami peningkatan hingga 250,68% pada tahun 2045 dengan pendapatan perkapita mencapai Rp87.992.747,76/tahun. Pada aspek sosial budaya kesadaran dan partisipasi masyarakat meningkat menjadi 77,35% di tahun 2045 atau meningkat 24,93%. Secara grafik skenario optimis ini ditunjukkan pada Gambar 7.



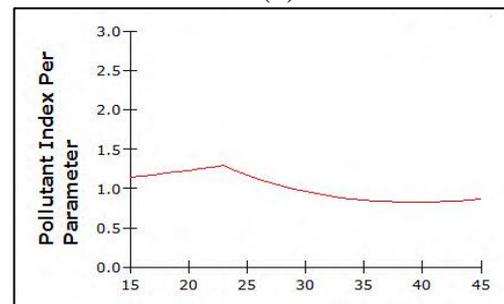
(a)



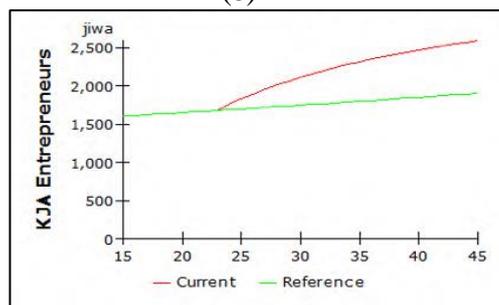
(b)



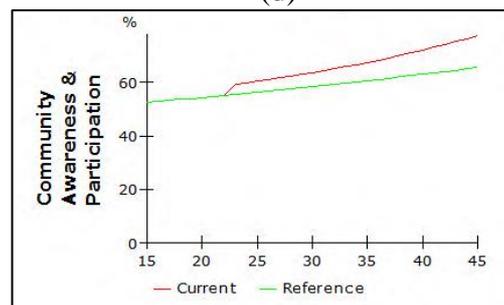
(c)



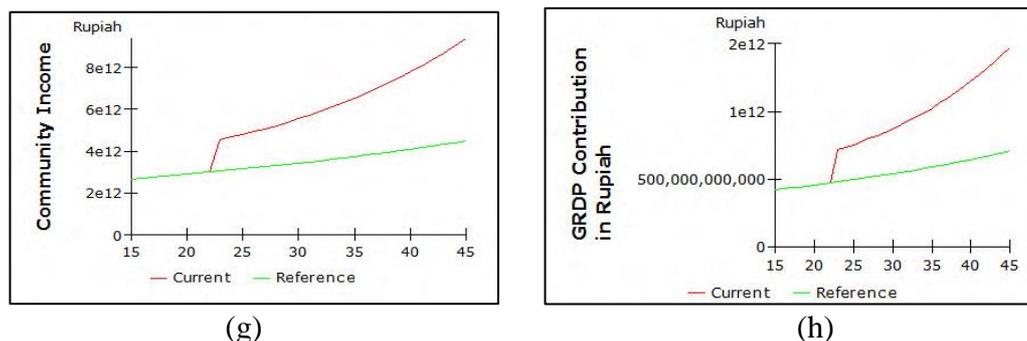
(d)



(e)



(f)



Gambar 7.

Skenario optimis (a) penggunaan lahan, (b) jumlah KJA, (c) tingkat pencemar, (d) indeks pencemar, (e) pengusaha KJA, (f) kesadaran dan partisipasi masyarakat, (g) pendapatan masyarakat, (h) kontribusi terhadap PDRB

Berdasarkan kondisi berbagai skenario tersebut, selanjutnya dihitung nilai sensitivitasnya yang diperoleh dari perbandingan antara skenario dengan kondisi BaU. Berdasarkan nilai sensitivitas antar variabel dalam skenario optimis dengan moderat, maka dapat

diketahui nilai sensitivitas O/M rasionya. Apabila nilainya diatas 2 maka skenario optimis dapat menjadi pilihan dalam penentuan kebijakan ke depan (Firmansyah, 2015). Secara rinci, nilai perbandingannya disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Sensitivitas variabel dalam skenario

Variabel Simulasi	Eksisting	Moderat (M)	Optimis (O)
Indeks Pencemaran	1,91	1,73	0,86
Partisipasi masyarakat (%)	65,44	70,47	77,35
Jumlah KJA (plot)	6.698	7.813	9.312
Jumlah Pengusaha KJA (orang)	1.905	2.248	2.592
Pendapatan Masyarakat (juta Rp)	4.491.243	6.547.889	9.365.244

Variabel Simulasi	Persentase		O/M
	Moderat (M)	Optimis (O)	
Indeks Pencemaran	9,42	54,97	5,83
Partisipasi masyarakat	7,69	18,20	2,37
Jumlah KJA	16,65	39,03	2,34
Jumlah Pengusaha KJA	18,01	36,06	2,00
Pendapatan Masyarakat	45,79	108,52	2,37
Nilai sensitivitas O/M rasio			2,98

Nilai sensitivitas O/M rasio sebesar 2,98 menunjukkan bahwa skenario optimis dapat menjadi pilihan dalam penerapan kebijakan serta mampu memberikan perubahan yang lebih baik terhadap beberapa kondisi variabel. Simulasi dengan skenario optimis merupakan pilihan terbaik hingga tahun 2045.

Dari intervensi 1) optimalisasi pengawasan dan penegakan hukum

penggunaan lahan, ijin usaha dan KJA, pengendalian pencemaran lingkungan yang ditingkatkan 75%; 2) peningkatan penyuluhan bagi masyarakat dengan jumlah peserta meningkat sebanyak 40%; 3) Peningkatan bantuan pemerintah sebesar 50 % dari kondisi saat ini, diproyeksikan mampu menekan indeks pencemaran BOD; COD; TTS dan Nitrat menjadi 0,86 0,20; 0,05; dan 0,16. Ini berarti perbandingan konsentrasi

parameter pencemar dengan baku mutu lingkungan masih berada di bawah nilai ambang batas <1. Indeks pencemar BOD; COD; TTS dan nitrat dapat ditekan secara berurutan menjadi 0,86 (-24,56%); 0,2 (-25,93); 0,05 (-16,67%); dan 0,16 (-23,81%) dari tahun 2015. Dari sisi pemanfaatan danau sebagai budidaya perikanan, berdasarkan hasil pemodelan dapat diproyeksikan jumlah plot KJA pada tahun 2045 mengalami peningkatan menjadi 9.312 plot dengan luasan diproyeksi hampir 14,9 ha, dengan pengusaha KJA diprediksi berjumlah 2.592 orang. KJA seluas 14,90 ha ini masih dalam batas wajar karena masih < 1% dari luas Danau Batur. Untuk mewujudkan danau yang lestari, maka hasil proyeksi optimis ini dapat menjadi rujukan bagi masyarakat dan pemerintah dalam membatasi perkembangan KJA yang ada, dan sekaligus dapat menjadi koreksi terhadap hasil penelitian Budiarsa *et al.*, (2018) yang menyatakan potensi pengembangan perikanan dapat dikembangkan hingga 5% dari luas Danau Batur.

Untuk menjamin keberlanjutan danau, perkembangan jumlah KJA yang mencapai 9.312 plot ini harus tetap berada dalam pengawasan dan pengendalian yang ketat dan berpedoman pada aturan yang berlaku yakni Peraturan Pemerintah Nomor 28 Tahun 2017 tentang Pembudidayaan Ikan, Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 28 Tahun 2009 tentang Daya Tampung Beban Pencemaran Air Danau dan/atau Waduk, serta Peraturan Presiden Nomor 60 Tahun 2021 tentang Penyelamatan Danau Prioritas Nasional. Pengawasan dan pengendalian akan lebih baik apabila melibatkan partisipasi masyarakat/kelembagaan tradisional masyarakat adat dengan menjunjung tinggi kearifan lokal. Dengan pemetaan yang tepat berdasarkan zonasi dan tetap mengedepankan estetika dan kearifan lokal serta inovasi penerapan

teknologi tepat guna yang ramah lingkungan, harapannya beban pencemar yang masuk ke perairan danau dapat ditekan (DPKPP, 2017).

Peningkatan produksi di wilayah ini diharapkan mampu berkontribusi terhadap peningkatan PDRB Kabupaten Bangli. Pada aspek ekonomi peningkatan kesejahteraan masyarakat dan kontribusi terhadap PDRB pada tahun 2045 diprediksi mengalami peningkatan hingga 250,68% dibandingkan tahun 2015, dengan pendapatan perkapita mencapai Rp.87.992.747,76/tahun. Peningkatan pendapatan masyarakat di kawasan ini secara ekonomi akan mampu meningkatkan kesejahteraan. Dengan peningkatan kesejahteraan dan intervensi yang dilakukan terhadap 3 hal tersebut maka diproyeksikan tingkat kesadaran dan partisipasi masyarakat dalam mengelola kawasan DTA Batur juga meningkat menjadi 77,35% di tahun 2045.

Perubahan penggunaan lahan sangat berkaitan erat dengan aspek lingkungan. Berbagai aktivitas pertanian, pemukiman, dan pariwisata mengakibatkan masuknya bahan pencemar dan peningkatan erosi pada danau. Masuknya berbagai bahan pencemar ini pada akhirnya sangat mempengaruhi kualitas Danau Batur. Produksi pertanian dalam arti luas di kawasan ini sangat dipengaruhi oleh kualitas danau. Danau sebagai sumber air yang digunakan dalam proses produksi pertanian/perikanan dapat mempengaruhi hasil produksi. Kualitas perairan danau yang semakin menurun akibat pencemaran, akan mengganggu kehidupan spesies di dalam perairan. Pencemaran ini dapat menyebabkan kematian tiba-tiba pada ikan dan eutrofikasi (Riani *et al.*, 2014; Riani, 2015). Hal ini menunjukkan pola kesamaan permasalahan utama antara Danau Batur dengan danau lainnya yang ada di seluruh dunia yaitu: 1) intensifnya penggunaan lahan sehingga memicu perubahan drastis tata ruang dan tata guna

lahan di daerah tangkapan air, 2) pencemaran di wilayah sekeliling dan di danau, 3) ekstraksi dan pemanfaatan berlebih air danau yang melebihi daya dukungnya (ILEC, 2003; EEA, 2012; Haryani *et al.*, 2013; Welde dan Gebremariam, 2017; Trolle *et al.*, 2019).

Dari sisi ekonomi jumlah produksi pertanian di kawasan ini berdampak langsung pada kesejahteraan masyarakat yang diukur melalui pendapatan masyarakat. Hal ini dikarenakan sebagian besar penduduk kawasan Danau Batur menggantungkan hidupnya pada sektor pertanian dalam arti luas (BPS, 2018). Peningkatan produksi secara langsung juga akan berkontribusi terhadap peningkatan PDRB. Peningkatan produksi ini harus didorong menuju pertanian berkelanjutan termasuk di dalamnya pengembangan teknologi pertanian yang ramah lingkungan dan peningkatan akses informasi serta pelatihan bagi para petani. Disamping itu, pengawasan dan penegakan hukum mutlak dibutuhkan untuk menjamin keberlanjutan kawasan ini.

Pada aspek sosial budaya, peningkatan kualitas SDM sangat berdampak pada produktivitas tenaga kerja dan menurunnya angka pengangguran. Masalah akses ke pendidikan dan pelatihan merupakan yang paling akut di daerah pedesaan (ILO, 2017). Tingkat pendidikan bukanlah satu-satunya faktor yang dapat menentukan kualitas SDM. Pendekatan holistik yang melibatkan akses pendidikan berkualitas, pelatihan keterampilan, dan dukungan sosial lainnya sangat penting untuk meningkatkan potensi dan kualitas SDM di suatu wilayah. Selain pendidikan formal, pelatihan keterampilan yang relevan dengan pengembangan potensi wilayah dapat mempersiapkan masyarakat dalam memenuhi kebutuhan lapangan kerja dan membangun peluang usaha. Dengan meningkatnya kualitas SDM,

harapannya kesadaran serta partisipasi masyarakat di kawasan Danau Batur nantinya juga dapat lebih meningkat.

4. SIMPULAN DAN SARAN

4.1 Simpulan

- 1) Keberlanjutan Danau Batur kawasan Batur UNESCO *Global Geopark* sangat dipengaruhi oleh aspek penggunaan lahan, lingkungan, ekonomi, dan sosial budaya masyarakat.
- 2) Faktor pengungkit utama dalam mendukung keberlanjutan Danau Batur yaitu: pengawasan dan penegakan hukum, bantuan pemerintah, serta pelatihan dan penyuluhan kepada masyarakat.
- 3) Hasil simulasi dengan skenario optimis yang diintervensi pada variabel terkontrol pengawasan dan penegakan hukum ditingkatkan 75%, penyuluhan dan pelatihan ditingkatkan 40%, serta bantuan pemerintah ditingkatkan 50% merupakan pilihan terbaik dalam pengelolaan kawasan Danau Batur berkelanjutan. Hasil skenario optimis ini diprediksi hingga tahun 2045 mampu menekan indeks pencemar BOD; COD; TTS dan nitrat secara berurutan menjadi 0,86 (-24,56%); 0,2 (-25,93); 0,05 (-16,67%); dan 0,16 (-23,81%). Peningkatan pendapatan masyarakat perkapita di diprediksi mencapai Rp. 87.992.747,76/tahun pada tahun 2045 dengan jumlah KJA diprediksi sebanyak 9.312 plot dengan 2.592 orang pengusaha. Jumlah plot yang diprediksi seluas 14,90 ha tersebut masih berada dibawah 1% dari luas Danau Batur.

4.2 Saran

- 1) Perlu dilakukan studi lanjutan yang diintegrasikan secara spasial dengan menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG) sehingga pengelolaan Danau Batur dapat divisualisasikan secara spasial.
- 2) Skenario ini diharapkan dapat dijadikan referensi dalam perumusan kebijakan bagi Pemerintah dalam pengelolaan Danau Batur.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, S., dan Simonovic, S.P. 2004. Spasial System Dynamics: New Approach for Simulation of Water Resources Systems. *Journal of Computing in Civil Engineering*. Volume 18 (4): 331 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2004\)18:4\(331\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2004)18:4(331)).
- Bates, B., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., Palutikof, J. 2008. *Climate change and water*. In: Technical Paper VI of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC Secretariat.
- Beaudry, F. 2018. *Lake Pollution: Types, Sources, and Solutions*. ThoughtCo, [thoughtco.com/lake-pollution-types-sources-and-solutions-1204112](https://www.thoughtco.com/lake-pollution-types-sources-and-solutions-1204112). Diakses 10 Mei 2023.
- BPS. 2018. *Bangli Dalam Angka*. Badan Pusat Statistik. Bangli
- Bridgewater, P., Guarino, E., dan Thompson, R.M. 2017. *Hydrology in the Anthropocene*. Australia: University of Canberra. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.09916-4.
- Budiasa, IW., Santosa, IG.N., Ambarawati, IG.A.A., Suada, IK., Sunarta, IN., Shchegolkova, N. 2018. Feasibility Study and Carrying Capacity of Lake Batur Ecosystem to Preserve Tilapia Fish Farming in Bali, Indonesia. *Biodiversitas* Vol. 19 (2): 613-620. DOI: 10.13057/biodiv/d190232.
- Christenson, B., Németh, K., Rouwet, D., Tassi, F., Vandemeulebrouck, J., Varekamp, J.C. 2015. Volcanic Lakes. In: Rouwet, D., Christenson, B., Tassi, F., Vandemeulebrouck, J. editors. *Volcanic Lakes*. Advances in Volcanology. Heidelberg Berlin: Springer.
- DPKPP. 2017. *Kajian Daya Dukung dan Zonasi Keramba Jaring Apung (KJA) di Danau Batur, Kabupaten Bangli*. Bangli. Dinas Pertanian, Ketahanan Pangan, dan Perikanan.
- EEA. 2012. *European Waters-Assessment of Status and Pressures*. Denmark: European Environment Agency.
- Ernawati, N.M., Arjana, IW.B., Sitawati, A.A.R. 2019. Tourist Accomodation: A Host-Tourist Matched for Batur Geotourism. *Journal of Indonesian Tourism and Development Studies* Vol. 7 (2): 74-82. Doi: 10.21776/ub.jitode.2019.007.02.03
- FAO. 2007. *Watershed Management in Action*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Firmansyah I. 2015. *Aplikasi Powersim Studio untuk Sistem Dinamik*. Sistem Dinamik Center-Indonesia. Bogor: Triwala Press.
- Forrester, J.W. 2009. *Some Basic Consep in System Dynamics*. Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology.
- Handayani, C.I.M., Arthana, IW., Merit, IN. 2011. Identifikasi Sumber Pencemar dan Tingkat Pencemaran

- Air di Danau Batur Kabupaten Bangli. *Ecotrophic*. 6 (1); 37-43.
- ILEC. 2003. *World Lake Vision*. Japan: International Lake Environment Committee Foundation.
- ILO. 2017. *Pelatihan Keterampilan Pedesaan: Manual umum Pelatihan untuk Pemberdayaan Ekonomi Pedesaan (TREE)*. Organisasi Perburuhan Internasional. Jakarta.
- KLH. 2011. *Profil 15 Danau Prioritas Nasional 2010-2014*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia.
- Kuncaka, A. 2004. *Pengendalian Pencemaran Lingkungan*. Yogyakarta: PSLH-UGM.
- Kundzewicz, Z.W., Mata, L.J., Arnell, N. W., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miller, K.A., Oki, T., Sen Z., dan Shiklomanov, I.A. 2007. Freshwater resources and their management. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Naningsi, N., Osawa, T., Merit, I.N. 2018. Study of Land Use Change from 1997 to 2014 Using Landsat Data in Bangli Regency, *International Journal of Environment and Geosciences* Vol. 2 (2): 89-97.
- Neuwirth, C., Peck, A., Simonovic, S.P. 2015. Modeling structural change in spasioal system dynamics: A Daisyworld example. *Journal Environmental Modelling & Software* 65 pp. 30-40.
- Radiarta, IN., Sagala, S.L. 2012. Model Spasioal Tingkat Kesuburan Perairan di Danau Batur Kabupaten Bangli Provinsi Bali dengan Aplikasi Sistem Informasi Geografis. *J. Ris. Akuakultur* Vol. 7 (3): 499-508.
- DOI: 10.15578/jra.7.3.2012.499-508.
- Riani, E., Sudarso Y., Cardova, M.R. 2014. Heavy Metals Effect on Unviable Larvae of *Dicrotendipes Simpsoni* (Diptera : Chironomidae), a Case Study From Saguling Dam, Indonesia. *Aquacultur, Aquarium, Conservation and Legislation (AACL) International Journal of The Bioflux Society*. Vol 2(7):76-84.
- Riani, E. 2015. The Effect of Heavy Metals on Tissue Damage in Different Organs of Goldfish Cultivated in Floating Fish Net in Cirata Reservoir, Indonesia. *PARIPEX, Indian Journal of Research*. 4 (2): 54-58.
- Saloranta, T.M., Malve, O., Bakken, T.H., Ibrekk, A.S., Moe, J. 2004. *Lake Water Quality Models and Benchmark Criteria*. Helsinki. Finland: Norwegian Institute for Water Research, Oslo Norway and Finnish Environment Institute.
- Sidaningrat, I.G.A.N., Arthana, I.W., dan Suryaningtyas, A.W. 2018. Tingkat Kesuburan Perairan Berdasarkan Kelimpahan Fitoplankton di Danau Batur, Kintamani, Bali. *Jurnal Metamorfosa V* (1) pp: 78-84.
- Sulawesty, F., dan Satya, A. 2013. Phytoplankton Community Structure and Other Related Eutrophication Symptoms Parameter in Lake Batur, Bali-Indonesia. *Oseanologi dan limnologi di indonesia (OLDI)*. Vol 39 No. 2 pp 125-262.
- Trolle, D., Nielsen, A., Andersen, H.E., Thodsen, H., Olesen, J.E., Borgesen, C.D., Refsgaard, J.C., Sonnenborg, T.O., Karlsson, I.B., Christensen, J.P., Markager, S., Jeepesen, E. 2019. Effects of changes in land use and climate on aquatic ecosystems:

- Coupling of models and decomposition of uncertainties. *Science of The Total Environment*. Vol 657: 627-633. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.055>.
- Upadhya, R., Pandey, K., Upadhyay, S.K., dan Bajpai, A. 2012. Annual Sedimentation Yield and Sediment Characteristics of Upper Lake, Bhopal, India *Journal of Chemical Sciences*, Vol. 2 (2): 65-74.
- Utama, IP., Osawa, T., Adnyana, IW.S. 2018. Evaluation of Land Use with Regional Spasial Plan (RTRW) Using Satellite Data and GIS in Batur UNESCO Global Geopark. *Ecotrophic*. Vol.12 (1): 57-67.
- Utama, IP., dan Adnyana, IW.S. 2019. Evaluation of Land Use with Land Capability Classification Using Satellite Data and GIS in Batur UNESCO Global Geopark. *Ecotrophic*, vol. 13, no. 1, 2019, pp. 61-73, [doi:10.24843/EJES.2019.v13.i01.p07](https://doi.org/10.24843/EJES.2019.v13.i01.p07).
- Welde, K., dan Gebremariam, B. 2017. Effect of land use land cover dynamics on hydrological response of watershed: Case study of Tekeze Dam watershed, northern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research* Vol. 5 (1): 1-16 <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.03.002>.
- Wijana, N. 2010. Penentuan Kualitas Air Danau Batur melalui Indeks Pencemaran Biologik dan Non Biologik, *Jurnal Bumi Lestari*, Volume 10 (2): 236-241.
- Zalewski, M., dan Wagner, I. 2000. *Ecohydrology*. Paris: UNESCO International Hydrological Programme.
- Zalewski, M., dan Lotkowska, I.W. 2004. *Integrated Watershed Management-Ecohydrology & Phytotechnology*. Paris: UNESCO International Hydrological Programme.