

Simulasi Perburuan Gajah Sumatera dengan Metode *Agent Based Modeling*

Ardika Satria¹, Rizty Maulida Badri², Alya Mutiara Firdausyi³

¹20920005, Program Studi Magister Sains Komputasi, Institut Teknologi Bandung

²20920006, Program Studi Magister Sains Komputasi, Institut Teknologi Bandung

³20920007, Program Studi Magister Sains Komputasi, Institut Teknologi Bandung

BAGIAN I PENDAHULUAN

II Latar Belakang

Spesies Gajah Sumatera (*Elaphas Maximus Sumatranus*) merupakan salah satu spesies gajah Asia yang masuk dalam *red list book* IUCN atau memiliki status terancam punah[1]. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi menurunnya laju populasi Gajah Sumatera, salah satunya yaitu tingkat pemburuan dan perubahan habitat aslinya[2].

Persebaran populasi Gajah Sumatera terbagi di tujuh provinsi yaitu Nanggroe Aceh Darussalam, Sumatra Utara, Riau, Jambi, Bengkulu, Sumatra Selatan, dan Lampung [3]. Penurunan populasi gajah dari tahun 2007 hingga 2017 mencapai 50% dalam satu generasi. Pada tahun 2017, diperkirakan terdapat 1.694-2034 individu di Pulau Sumatera[4]. Degradasi hutan habitat asli gajah untuk pertanian atau perkebunan mengakibatkan keberlangsungan kehidupan gajah tidak stabil sehingga tidak dapat lagi menampung lebih banyak spesies[5]. Kondisi ini juga dapat memicu konflik manusia dengan gajah yang kerap kali terjadi di perbatasan hutan konservasi Way Kambas dan konservasi Bukit Barisan Selatan[2]. Informasi mengenai distribusi populasi dan pergerakan perburuan serta kondisi habitat asli sangat diperlukan untuk menentukan kebijakan dan strategi konservasi.

Dalam kurun waktu 10 tahun pada strategi dan rencana aksi konservasi Gajah Sumatera dan gajah Kalimantan 2007-2017 memberikan gambaran bahwa peningkatan populasi gajah masih sulit dilakukan. Sehingga belum mampu mendukung upaya konservasi gajah di Sumatera. Oleh karena itu pemerintah membentuk rencana tindakan mendesak tiga tahun untuk mendukung dan memulihkan konservasi gajah di Sumatera, mulai dari tahun 2020 hingga 2023 yang mana direncanakan dapat meningkatkan 10% gajah prioritas di Pulau Sumatera. Sementara itu data menunjukkan bahwa populasi Gajah Sumatera turun sebesar 61,3% sejak tahun 2007 sampai 2019 [4]. Akibat dari kematian non alami yang mana terjadi perburuan seperti jerat, racun dan pagar listrik. Tindakan perburuan menyumbangkan dampak terbesar bagi keberlangsungan populasi gajah di Sumatera [6].

Persebaran populasi yang tidak merata di wilayah hutan konservasi mengakibatkan pecahnya populasi menjadi ukuran yang sedikit. Berkisar kurang dari lima individu gajah pada satu populasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Hal yang tidak diinginkan dapat terjadi seperti perkawinan sedarah. Ancaman ini dapat mengakibatkan tingkat erosi genetik yang tinggi dan ketidakmampuan perkembangbiakan dalam kurun waktu yang singkat [7].



Gambar 1. Populasi Gajah Sumatera.

Berdasarkan kasus yang kerap kali terjadi konflik gajah dengan pemukiman bahwa daerah yang paling bermasalah adalah di Aceh, Riau, Jambi dan Lampung. Seperti di Aceh Tengah dan Aceh Timur sering terjadi kematian gajah tidak teridentifikasi. Tingkat kematian tinggi hingga 80% dari tahun 2013-2014 di Riau

juga menjadi perhatian penting. Sedangkan di Jambi, populasi gajah banyak terpecah hingga populasi kecil dan berisiko konflik dengan pemukiman sehingga kematian antara keduanya sering terjadi. Sementara di Lampung, tepatnya di Bukit Barisan Selatan dan Way Kambas mengalami penurunan populasi sejak tahun 2004 hingga 2017, konflik antara manusia dan gajah juga menjadi salah satu penyebab utama [4].

Komponen seperti habitat, rasio perkembangbiakan, kematian, probabilitas eksplorasi perburuan, tingkatan umur gajah dan sumber air merupakan kesatuan yang dapat menentukan pergerakan populasi gajah terhadap lingkungan sekitarnya. Pergerakan satwa-satwa liar dapat diprediksi melalui data final di lapangan yang dikombinasikan dengan model statistik [8]. Adapun sistem yang dibangun masih sangat kompleks karena terdapat banyak komponen yang mempengaruhi di atas. Salah satu metode yang dapat diterapkan pada sistem ini adalah metode *Agent Based Modeling* (ABM) [9]. Setiap individual pada metode ABM dapat memprediksi respons spasial terhadap lingkungan dari masa ke masa. Fleksibilitas ABM dapat menentukan pergerakan akhir dari individual melalui simulasi yang dibuat dengan aturan-aturan secara intrinsik dan ekstrinsik terhadap lingkungannya [10].

Pada penelitian lainnya menunjukkan bahwa model kuantitatif, seperti berbasis persamaan dan teori *game* dapat memberikan gambaran yang tepat antara pemburu, gajah dan pengawas hutan [11]. Akan tetapi model dengan berbasis persamaan memiliki keterbatasan di lingkup spasial, yang menyulitkan mitigasi perburuan yang sedang terjadi. Seperti model dengan pemburu yang secara homogen di ruang lingkup kecil, tidak berdasarkan persepsi dan prediksi risiko serta potensi pengambilan keputusan, yang belum menyesuaikan model sebenarnya di lapangan [12]. Sedangkan pada model teori permainan (*game theory*) tidak dapat menggambarkan keadaan ekologi dari gajah, keberagaman keputusan terhadap pemburu dan pengawas hutan, dan umpan balik terhadap populasi gajah terhadap risiko dari perburuan. Sementara itu teori permainan

dapat menggambarkan secara adaptif pengambilan keputusan berdasarkan potensi keberadaan gajah dan pemburu [13].

Simulasi perburuan gajah dengan metode ABM telah terbukti dapat dikembangkan sebagai langkah strategis untuk mendukung kebijakan pemerintah yang telah disepakati. Salah satu pengembangan metode ini pada simulasi perburuan Gajah Afrika pada penelitian Neil, dkk [9]. yang menyatukan elemen-elemen kompleks yang mendasari model seperti yang di tunjukkan pada Tabel 1. Perbandingan metode lainnya juga ditunjukkan pada Tabel 1. Pemanfaatan model ABM di masa depan dapat disinkronisasi dengan data yang terdapat di lapangan seperti data GPS keberadaan pergerakan gajah, dan situasi lingkungan dari citra satelit seperti GIS, dan kasus pemburuan yang berlangsung. Sehingga didapat strategi kebijakan yang mengawasi kasus kematian gajah di Sumatera, dan membuat langkah keputusan baru terhadap lingkungan habitat gajah [9].

Tabel 1. Perbandingan model pemburuan gajah [9].

Model, komponen dan properti	Equation based model	Game theoretical model	Konseptual Agent Based Model	Pengembangan lanjut <i>Agent Based Model</i>
Pemburu	Representatif agen tunggal	Sedikit agen tunggal	Banyak agen Representatif	Banyak agen Representatif
Pengawas Kebijakan	Representatif agen tunggal	Representatif agen tunggal	Representatif agen tunggal	Banyak agen Representatif
Gajah	Variabel statis	Variabel statis	Banyak agen representatif	Banyak agen Representatif
Spasial	Kadang- kadang	Kadang- kadang	Ya	Ya
Tingkat individual dalam heterogenitas pada	Tidak	Tidak	Ya	Ya

pengambilan keputusan				
Sifat gajah dan ekologi	Tidak masuk	Tidak masuk	Masuk	Masuk
Tingkat relatif dari data yang dibutuhkan	Rendah	Rendah-Sedang	Tinggi	Tinggi
Keluaran model	Dapat mengambil hubungan antara usaha pengawas kebijakan dengan tingkat aktivitas ilegal	Dapat mengambil interaksi adaptif antara pengawas kebijakan dan pemburu	Dapat mengambil antara populasi heterogen dari pemburu, pengawas hutan dan gajah	Dapat mengambil antara populasi heterogen dari pemburu, pengawas hutan dan gajah

Pada penelitian ini metode ABM digunakan dengan menerapkan konseptual ABM dari penelitian sebelumnya, akan tetapi variabel yang digunakan menyesuaikan dengan kondisi geografis dan ekologi di pulau Sumatera. Simulasi dilakukan dengan mempertimbangkan umur gajah yang tidak dibahas di penelitian sebelumnya.

I.II Tujuan

Adapun tujuan penelitian ini adalah mendapatkan simulasi model ABM perburuan gajah di pulau Sumatera dengan mempertimbangkan beberapa komponen seperti umur gajah, jumlah pemburu, dan jenis kelamin gajah. Untuk mendapatkan parameter jumlah populasi gajah, jumlah kelahiran dan kematian dalam kurun waktu 50 tahun dengan kondisi tingkat perburuan meningkat dan tingkat kebijakan yang semakin ketat.

I.III Manfaat Penelitian

Model simulasi ABM perburuan Gajah Sumatera dapat diterapkan sebagai model yang dapat digunakan untuk mengimplementasikan skenario yang terjadi di lapangan dan mengambil langkah strategis konservasi Gajah Sumatera yang didukung dengan data-data real di lapangan, seperti pergerakan gajah dan kondisi geografis kantung-kantung Gajah Sumatera.

BAGIAN II TINJAUAN PUSTAKA

II.I Gajah Sumatera

Secara ilmiah gajah diklasifikasikan ke dalam keluarga *Elephantidae*. Terdapat dua genus hewan yang termasuk dalam keluarga *Elephantidae* yang masih hidup di muka bumi yaitu genus *Elephas* dan *Loxodonta* [14]. Genus *Elephas* terdiri dari satu spesies yaitu *Elephas maximus* atau yang kita kenal sebagai gajah Asia [15]. Sedangkan *Loxodonta* merupakan genus terdiri dari dua spesies yakni *Loxodonta africana* dan *Loxodonta cyclotis*, keduanya digolongkan sebagai Gajah Afrika [14]. Gajah Asia atau *Elephas maximus* memiliki tiga sub spesies yaitu *Elephas maximus indicus*, *Elephas maximus maximus* dan *Elephas maximus sumatranus* [16]. Gajah Sumatera adalah salah satu sub spesies gajah Asia, nama ilmiahnya *Elephas maximus sumatranus*.

Gajah Asia tersebar ke dalam tiga region besar yaitu [5]:

1. India (Sub-continental): India, Nepal, Bhutan dan Bangladesh
2. Asia Tenggara (Sub-continental): Cina, Myanmar, Thailand, Kamboja, Laos, Vietnam dan Malaysia.
3. Asia Kepulauan: Kepulauan Andaman (India), Sri Lanka, Sumatera (Indonesia) dan Borneo (Malaysia dan Indonesia)

Gajah asia (*Elephas maximus*) di Indonesia hanya ditemukan di Sumatera dan Kalimantan bagian timur. Spesies ini terdaftar dalam *red list book* IUCN (*The World Conservation Union*), dengan status terancam punah, sementara itu CITES

(*Convention on International Trade of Endangered Fauna and Flora* / Konvensi tentang Perdagangan International Satwa dan Tumbuhan) telah mengkategorikan gajah Asia dalam kelompok Appendix I. di Indonesia sejak tahun 1990. Di Indonesia, sejak tahun 1931 (Ordunansi Perlindungan Binatang Liar tahun 1931), satwa ini telah dinyatakan sebagai satwa dilindungi Undang-undang dan hampir punah sehingga keberadaannya perlu diperhatikan dan dilestarikan. Penelitian terakhir dengan menggunakan analisis genetika menunjukkan bahwa Gajah Sumatera (*E. maximus sumatranus*; Gambar 2.) dan gajah kalimantan (*E.maximus borneensis*; Gambar 3.) adalah *monophyletic* dan dikategorikan sebagai *Evolutionary Significant Unit* (ESU; Fleischer *et al.* 2001; Fernando *et al.* 2004).



Gambar 2. Gajah Sumatera (*E. maximus sumatranus*; Kredit foto: Arnold Sitompul/CSI)

Konsekuensi ini menempatkan bahwa Gajah Sumatera dan gajah kalimantan memiliki prioritas yang tinggi dalam konservasi gajah asia. Dengan status ESU dalam kaitan dengan pengelolaan di *captivity* seperti kebun binatang dan taman safari, maka kedua sub spesies ini harus ditempatkan dan dikelola secara terpisah sehingga terhindar dari terjadinya perkawinan campur. Perkawinan campur antar keduanya sangat bertentangan dengan konsep pengelolaan gajah *ex-situ* [17].

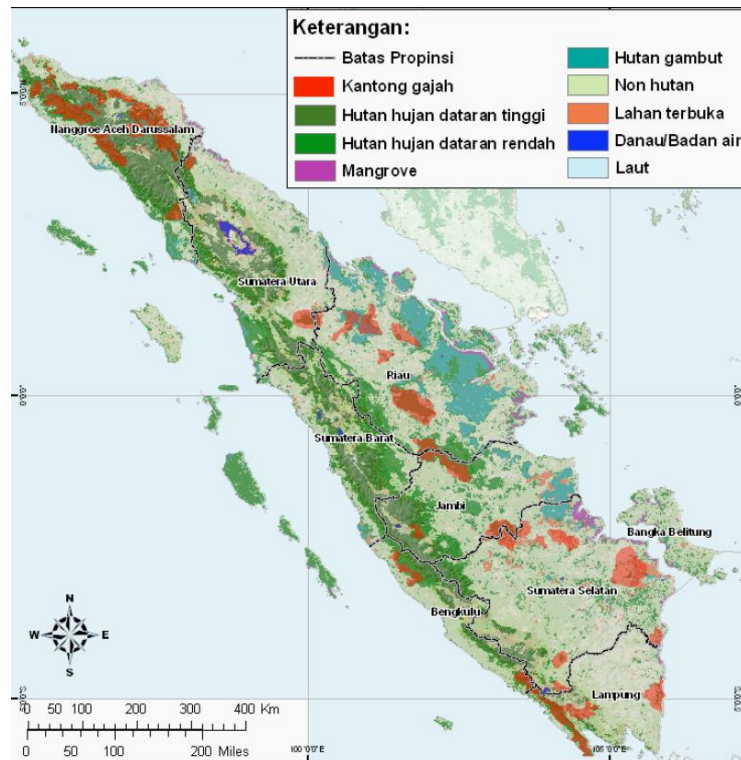


Gambar 3. Gajah kalimantan (*E. maximus bornensis*; Kredit foto: WWF)

II.I.I Ciri-Ciri Gajah Sumatera

Gajah Sumatera memiliki ciri khas tertentu, terutama bila diamati dari bentuk fisiknya. Ciri-ciri Gajah Sumatera secara umum adalah sebagai berikut:

- Bobot Gajah Sumatera sekitar 3-5 ton dengan tinggi 2-3 meter.
- Kulitnya terlihat lebih terang dibanding gajah Asia lain dan di bagian kupingnya sering terlihat depigmentasi, terlihat seperti flek putih kemerahan.
- Hanya gajah jantan yang memiliki gading yang panjang. Pada betina, walaupun ada gadingnya pendek hampir tidak kelihatan. Berbeda dengan Gajah Afrika di mana jantan dan betina sama-sama punya gading.
- Ciri mencolok lainnya ada pada bagian atas kepala. Gajah Sumatera memiliki dua tonjolan sedangkan Gajah Afrika cenderung datar.
- Keping Gajah Sumatera lebih kecil dan berbentuk segitiga sedangkan Gajah Afrika kupingnya besar dan berbentuk kotak.
- Gajah Sumatera memiliki 5 kuku di kaki bagian depan dan 4 kuku di kaki belakang.



Gambar 4. Sebaran Gajah Sumatera.

II.I.II Habitat Gajah Sumatra

Gajah Sumatera hidup di hutan-hutan dataran rendah di bawah 300 meter dpl. Tapi juga sering ditemukan merambah ke dataran yang lebih tinggi. Jenis hutan yang disukainya adalah kawasan rawa dan hutan gambut. Populasinya tersebar di 7 propinsi meliputi Nangroe Aceh Darussalam, Sumatera Utara, Riau, Jambi, Bengkulu, Sumatera Selatan dan Lampung [18].

Pada tahun 2007 populasi Gajah Sumatera di alam liar diperkirakan sekitar 2400-2800 ekor. Turun separuhnya dibanding tahun 1985 sekitar 4800 ekor. Saat ini jumlahnya terus diperkirakan mengalami penyusutan. Karena habitat hidupnya terus menyempit. Terhitung 25 tahun terakhir, Pulau Sumatera telah kehilangan 70% luas hutan tropis yang menjadi habitat gajah [3].

II.I.III Kebiasaan dan Perilaku Hidup Gajah

Gajah termasuk binatang nokturnal yang aktif di malam hari. Hewan ini hanya membutuhkan waktu tidur selama 4 jam per hari dan terus bergerak selama 16

jam untuk menjelajah dan mencari makanan. Sisanya digunakan untuk berkubang dan bermain. Pergerakan gajah dalam sehari bisa mencapai areal seluas 20 km². Idealnya kebutuhan luas areal untuk habitat gajah liar minimal 250 km² berupa hamparan hutan yang tidak terputus [19].

II.I.IV Perilaku Makan

Gajah Sumatera memakan rumput-rumputan, daun, ranting, umbi-umbian dan kadang buah-buahan. Setidaknya terdapat 69 spesies tumbuhan yang bisa dijadikan pakan gajah. Tumbuhan tersebut terdiri dari 29 kelompok rumput-rumputan dan 40 kelompok tanaman non rumput. Gajah Sumatera diketahui lebih menyukai rumput-rumputan.[19] Efisiensi sistem pencernaan gajah sangat buruk. Hewan ini bisa membuang fesesnya setiap satu jam sekali. Tidaklah heran bila dalam sehari Gajah Sumatera memerlukan makanan hingga 230 kg atau setara dengan 5-10% dari bobot tubuhnya. Sedangkan untuk minum dibutuhkan 160 liter air setiap hari. Di musim kemarau Gajah Sumatera bisa menggali air di dasar sungai yang mengering hingga kedalaman satu meter.

II.I.V Perilaku Reproduksi

Gajah jantan memiliki periode *musth*, yaitu masa produksi hormon testosteron. *Musth* menandakan bahwa gajah jantan sudah siap kawin. Secara umum gajah jantan akan mengalami *musth* setelah berumur sekitar 12-15 tahun. Saat gajah jantan memasuki periode *musth* akan terjadi perubahan perilaku, nafsu makannya menurun, gerakannya lebih agresif dan suka mengendus-ngendus dengan belalainya. Selain itu terjadi juga perubahan fisik seperti sering meneteskan urin, penis sering keluar dan dari dahinya mengeluarkan kelenjar berbau menyengat.

Gajah betina bisa melahirkan anak setelah berumur di atas 9-10 tahun. Usia kehamilan mencapai 22 bulan. Bayi Gajah Sumatera yang baru lahir memiliki bobot tubuh sekitar 40-80 kg dengan tinggi 75-100 cm. Bayi tersebut akan diasuh oleh induknya hingga berumur 18 bulan. Dalam satu kali kehamilan biasanya

terdapat satu bayi, namun dalam beberapa kasus ada juga yang melahirkan hingga dua bayi. Jarak waktu antar kehamilan berkisar 4-4,5 tahun [20].

II.I.VI Perilaku Sosial

Gajah merupakan hewan sosial yang hidup berkelompok. Kelompok berperan penting dalam menjaga kelangsungan hidup gajah. Jumlah anggota kelompok sangat bervariasi. Tergantung pada kondisi sumber daya alam dan luas habitat. Gajah Sumatera bisa ditemukan dalam kelompok yang terdiri dari 20-35 ekor, tetapi juga ada kawanan yang hanya 3 ekor saja. Setiap kelompok dipimpin oleh seekor betina. Sedangkan yang jantan berada dalam kelompok untuk periode tertentu saja. Gajah yang tua akan hidup memisahkan diri dari kelompoknya hingga pada akhirnya mati [21].

Gajah Sumatera sangat peka dengan bunyi-bunyian. Untuk melakukan perkawinan dan berkembang biak, gajah memerlukan suasana yang tenang dan nyaman. Suara alat-alat berat dan gergaji mesin sangat mengganggu perkembangbiakan gajah [16].

Pada tahun 1980-an, pernah dilakukan survei gajah di seluruh Sumatera dengan menggunakan metode penaksiran secara cepat (*rapid assessment survey*). Hasil survei tersebut memperkirakan populasi Gajah Sumatera berjumlah 2800-4800 individu dan tersebar di 44 lokasi [22]. Hasil survey ini tidak pernah diperbaharui secara sistematis kecuali di provinsi Lampung yang dilakukan oleh *Wildlife Conservation Society* (WCS) pada tahun 2000. Hasil penelitian yang komprehensif di provinsi ini menunjukkan bahwa provinsi Lampung telah kehilangan 9 (sembilan) kantong populasi gajah dari 12 (dua belas) kantong yang ditemukan pada tahun 1980 [23].

II.II Pemodelan Berbasis Agen

Agent Based Modeling merupakan salah satu metode pemodelan yang dapat mensimulasikan interaksi antara agen/individu dalam suatu sistem, sehingga dapat diketahui model dari sistem tersebut dan pengaruh individu tersebut terhadap

sistem. Masing-masing individu tersebut memiliki ciri dan perilaku yang unik atau berbeda satu sama lain. Sehingga ketika terjadi interaksi antar agen maka akan terjadi perilaku yang tidak dapat diprediksi sebelumnya. Kemampuan agen untuk menentukan perilaku ini disebut *self-organization*. Perilaku yang tidak terduga sebelumnya disebut perilaku kemunculan [24].

Dalam pemodelan berbasis agen (ABM), sebuah sistem dimodelkan sebagai kumpulan entitas pembuat keputusan otonom yang disebut agen. Setiap agen secara individual menilai situasinya dan membuat keputusan berdasarkan seperangkat aturan. Agen dapat menjalankan berbagai perilaku yang sesuai untuk sistem yang mereka wakili—misalnya, memproduksi, mengonsumsi, atau menjual. Interaksi kompetitif yang berulang antara agen adalah fitur pemodelan berbasis agen, yang bergantung pada kekuatan komputer untuk mengeksplorasi dinamika di luar jangkauan metode matematika murni. Pada tingkat yang paling sederhana, model berbasis agen terdiri dari sistem agen dan hubungan di antara mereka. Bahkan model berbasis agen sederhana dapat menunjukkan pola perilaku yang kompleks dan memberikan informasi berharga tentang dinamika sistem dunia nyata yang ditirunya. Selain itu, agen mungkin mampu berkembang, memungkinkan munculnya perilaku yang tidak terduga. ABM yang canggih terkadang menggabungkan jaringan saraf, algoritme evolusi, atau teknik pembelajaran lainnya untuk memungkinkan pembelajaran dan adaptasi yang realistis [25].

Manfaat ABM dari teknik pemodelan lainnya dapat ditangkap dalam tiga pernyataan: (i) ABM menangkap fenomena yang muncul; (ii) ABM memberikan deskripsi alami dari suatu sistem; dan (iii) ABM fleksibel. Namun, jelas bahwa kemampuan ABM untuk menangani fenomena yang muncul adalah untuk mendorong manfaat lainnya [25].

BAGIAN III METODOLOGI PENELITIAN

III.I Kerangka Simulasi

Berikut kerangka simulasi *agent based modeling* simulasi perburuan Gajah Sumatera.

- Agen I : Gajah
- Agen II : Pemburu
- Interaksi : Perburuan gajah oleh pemburu
- Properti :
 - Gajah : usia, jenis kelamin, rasio perkembangbiakan, tingkat kematian, kemampuan bertahan hidup
 - Pemburu : jumlah pemburu, probabilitas eksplorasi, penangkapan oleh pihak berwajib
 - Lingkungan : hutan
- Perilaku agen :
 - Ukuran gajah menggambarkan usia
 - Semakin bertambah usia gajah, maka semakin besar ukuran tubuhnya
 - Warna gajah menggambarkan jenis kelamin
 - Pemburu akan bergerak secara acak dan ketika bertemu gajah, pemburu akan memburu gajah
 - Gajah dapat menyelamatkan diri berdasarkan tingkat kemampuan bertahan hidupnya
 - Gajah akan mati ketika usianya mencapai usia maksimum
 - Gajah betina dengan rentang usia tertentu dapat melakukan perkembangbiakan sehingga muncul gajah muda (*calf*) pada populasi
 - Jika pemburu tertangkap, maka jumlah pemburu akan berkurang
 - Jika peminat gading gajah meningkat, maka jumlah pemburu akan meningkat

III.II Parameter

- Parameter model :
 - Jumlah populasi awal gajah

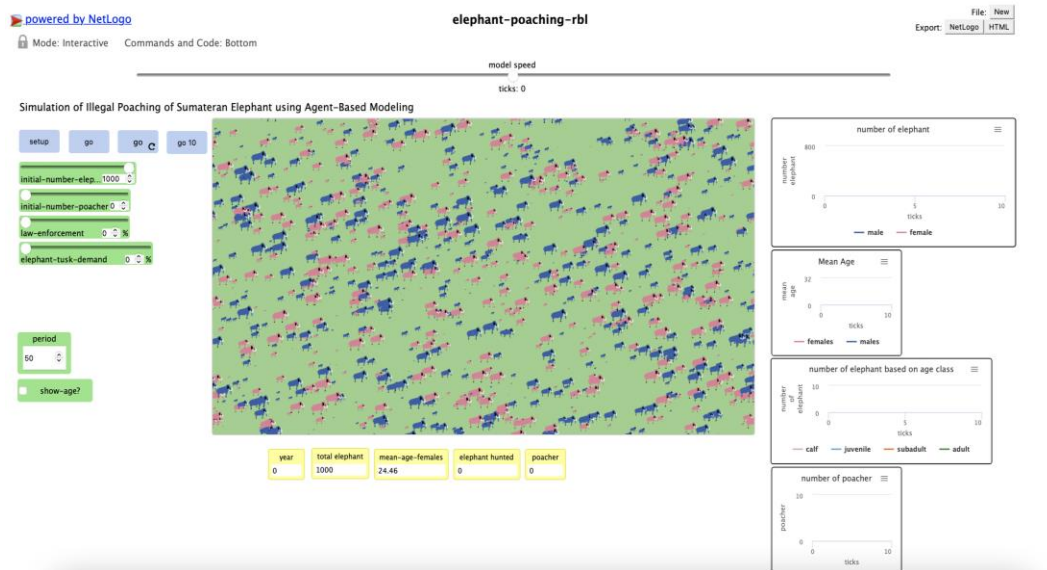
- Jumlah awal pemburu
- Kemungkinan bereproduksi gajah
- Tingkat kematian gajah
- Batas waktu simulasi (dalam tahun)
- Langkah waktu : Setiap 1 *tick* akan menggambarkan 3 bulan (1 kuartar tahun)
- Pengukuran :
 - Grafik distribusi gajah berdasarkan usia
 - Grafik distribusi gajah berdasarkan jenis kelamin
 - Grafik jumlah pemburu
 - Jumlah akhir populasi gajah
 - Jumlah akhir pemburu

III.III Desain Konsep Penelitian

Adapun desain konsep pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

a. Skenario 1

Pada model pertama, populasi awal gajah sebanyak 1000 individu dengan pembagian antara gajah jantan dan betina yang acak, persebaran usia yang acak, dan persebaran posisi yang acak. Tidak terdapat pemburu serta 0% *law-enforcement* yang diaplikasikan pada skenario. Skenario pertama bertujuan untuk melihat perkembangan jumlah populasi gajah dalam waktu 50 tahun.



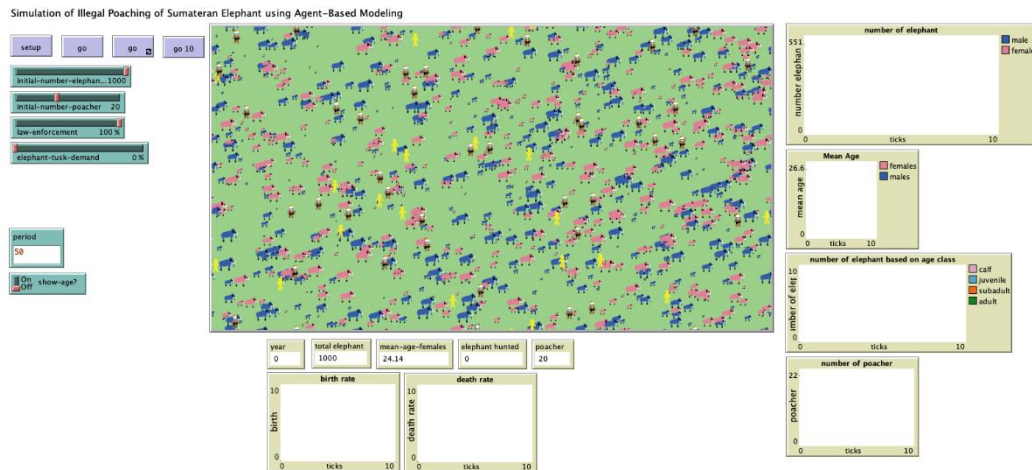
Gambar 5. Tampilan Awal Netlogo Untuk Skenario Pertama.

b. Skenario 2

Pada skenario kedua, pemburu mulai dilibatkan dalam simulasi. Terdapat 1000 ekor gajah pada awal simulasi serta variasi jumlah pemburu sebanyak 5, 10, 20, dan 50 orang. Nilai keketatan patroli hutan (*law-enforcement*) yang digunakan konsisten di angka 0%. Skenario kedua ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh jumlah pemburu terhadap pertumbuhan populasi Gajah Sumatera.



Gambar 6. Tampilan awal NetLogo untuk simulasi skenario kedua dengan jumlah pemburu sebanyak 50 orang.



Gambar 7. Tampilan awal NetLogo untuk simulasi skenario ketiga dengan keketatan peraturan sebesar 100%.

c. Skenario 3

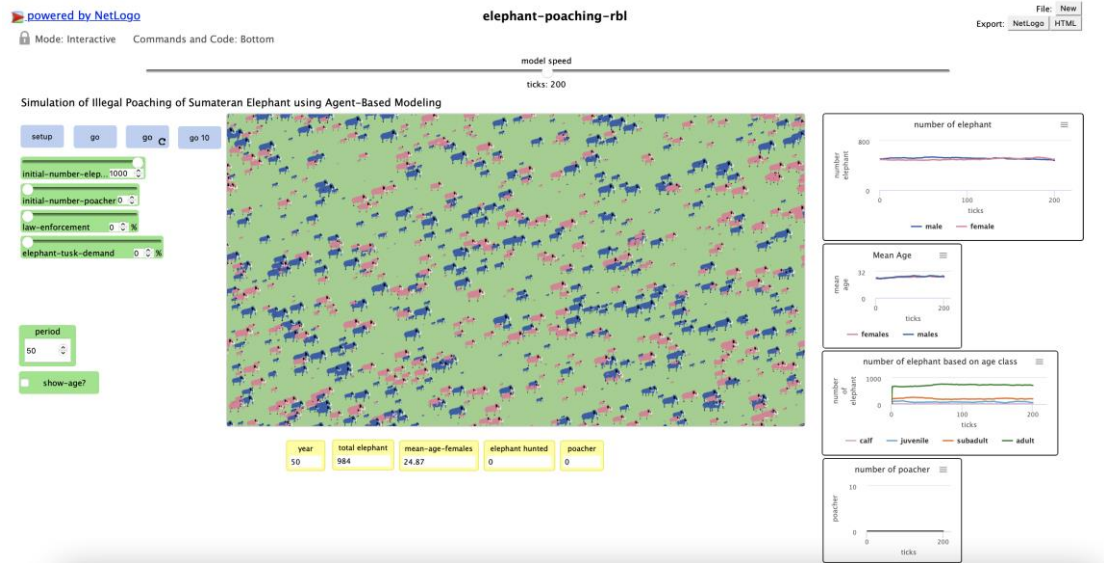
Skenario ketiga bertujuan untuk melihat pengaruh adanya peraturan (*law-enforcement*) dalam kasus ini berupa patroli hutan yang akan menangkap pemburu, terhadap keberlangsungan hidup Gajah Sumatera. Jumlah populasi awal gajah sebanyak 1000 individu, 20 orang pemburu dengan keketatan peraturan bervariasi dari 25%, 50%, 75%, dan 100%.

BAGIAN IV HASIL DAN PEMBAHASAN

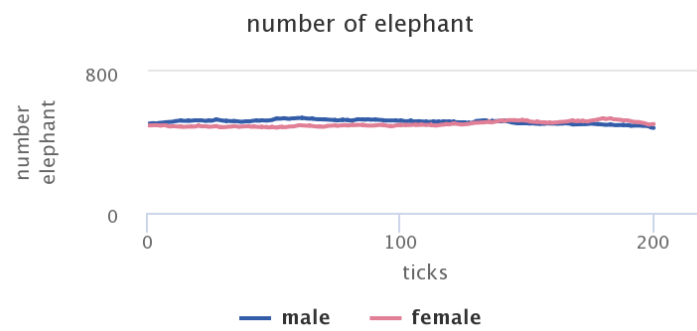
IV.I Data dan Hasil

A. Skenario 1

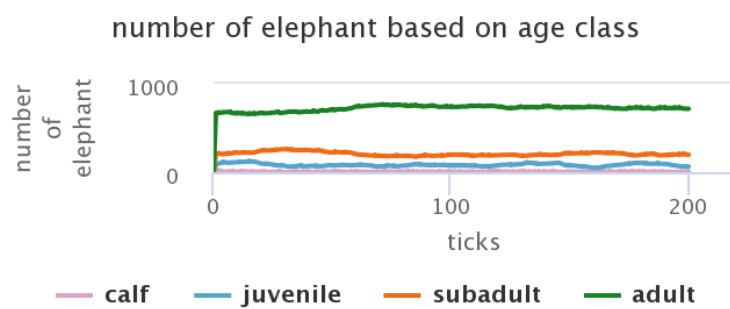
Berikut merupakan hasil yang diperoleh dari hasil simulasi dengan skenario pertama.



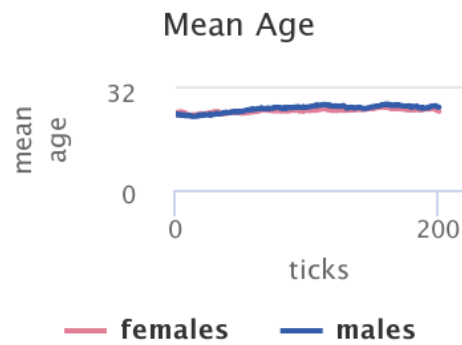
Gambar 8. Tampilan Netlogo Pada Akhir Simulasi Skenario Pertama.



Gambar 9. Grafik Pertumbuhan Gajah Pada Skenario Pertama



Gambar 10. Grafik persebaran usia gajah pada skenario pertama.



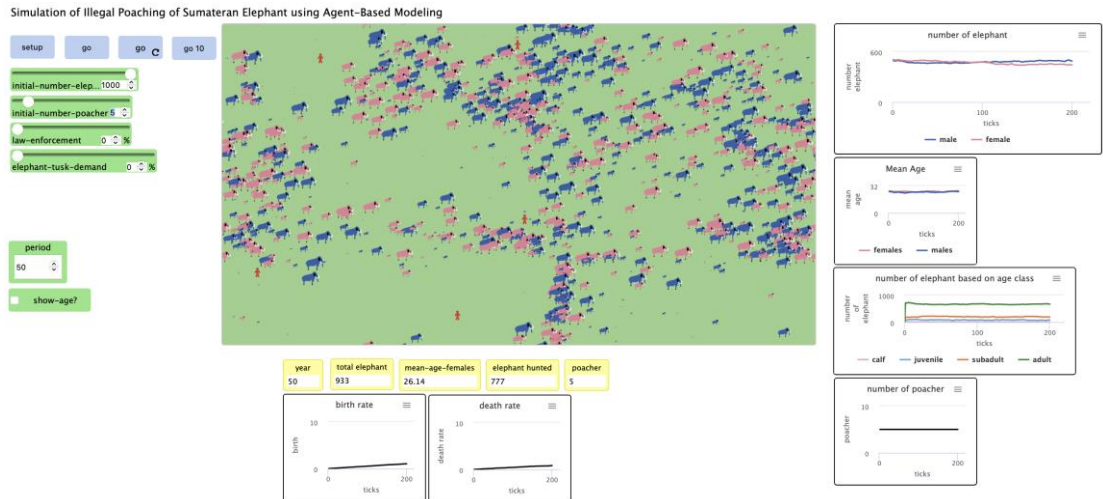
Gambar 11. Grafik rata-rata usia gajah terhadap waktu pada skenario pertama.

Tabel 2. Data Simulasi Skenario Pertama.

	Nilai Awal	Nilai Akhir
Jumlah Gajah	1000	984
Gajah Betina	495	503
Gajah Jantan	505	481
Bayi Gajah	24	8
Gajah Muda	94	62
Gajah Sub-dewasa	212	197
Gajah Dewasa	670	717
Rata-rata usia gajah jantan	23.85	26.16
Rata-rata usia gajah betina	24.46	24.87

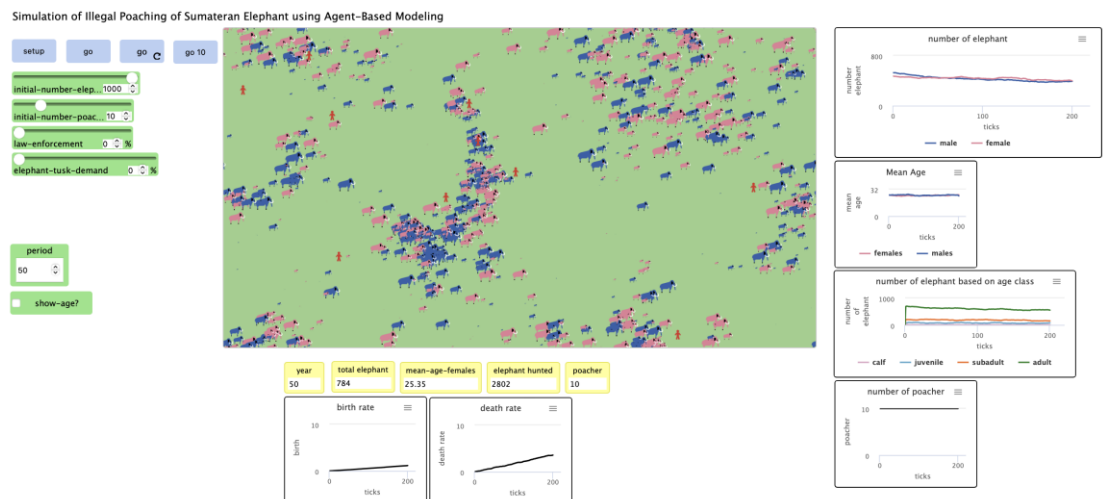
B. Skenario 2

Berikut merupakan hasil yang diperoleh dari simulasi skenario kedua dengan jumlah pemburu 5 individu yang ditunjukkan pada Gambar 12.



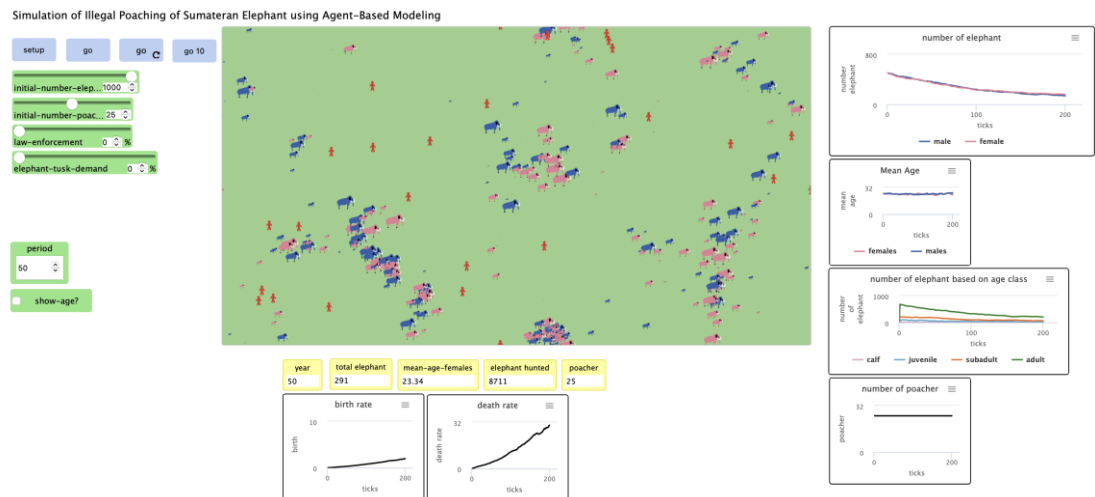
Gambar 12. Simulasi Skenario Kedua Dengan Jumlah Pemburu 5 Individu.

Kemudian berikut hasil skenario dengan jumlah pemburu 10 individu yang ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Simulasi Skenario Kedua Dengan Jumlah Pemburu 10 Individu.

Lalu skenario kedua dicoba dengan jumlah pemburu dua kali dari sebelumnya yaitu 25 individu yang hasilnya ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Simulasi Skenario Kedua Dengan Jumlah Pemburu 25 Individu.

Berikut hasil skenario kedua dengan jumlah pemburu adalah 50 individu yang ditunjukkan pada Gambar 15. Data telah dirangkum dari semua percobaan pada skenario kedua yang ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4.



Gambar 15. Simulasi Skenario Kedua Dengan Jumlah Pemburu 50 Individu

Tabel 3. Data Simulasi Skenario kedua dengan pemburu berjumlah 5 dan 10 individu.

	5 Pemburu		10 Pemburu	
	Awal	Akhir	Awal	Akhir
Jumlah Gajah	1000	933	1000	784
Gajah Betina	506	444	473	397

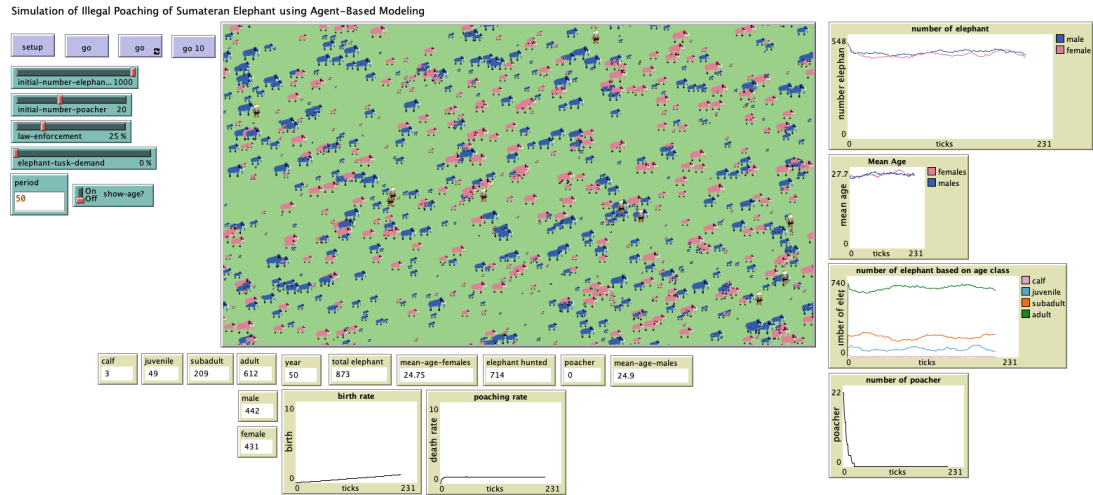
Gajah Jantan	494	489	527	387
Bayi Gajah	21	2	19	6
Gajah Muda	81	76	80	78
Gajah Sub-dewasa	185	188	205	150
Gajah Dewasa	711	667	688	550
Rata-rata usia gajah jantan	25.7	25.12	25.18	24.12
Rata-rata usia gajah betina	25.52	26.14	24.93	25.53
Gajah yang mati	0	777	0	2802

Tabel 4. Data Simulasi Skenario Kedua dengan pemburu berjumlah 25 dan 50 individu.

	25 Pemburu		50 Pemburu	
	Awal	Akhir	Awal	Akhir
Jumlah Gajah	1000	291	1000	19
Gajah Betina	496	156	508	11
Gajah Jantan	504	135	492	8
Bayi Gajah	19	0	23	0
Gajah Muda	82	28	75	0
Gajah Sub-dewasa	208	61	195	7
Gajah Dewasa	682	202	667	12
Rata-rata usia gajah jantan	24.66	25.1	25.16	24.25
Rata-rata usia gajah betina	24.9	23.34	24.48	22.68
Gajah yang mati	0	8711	0	12727

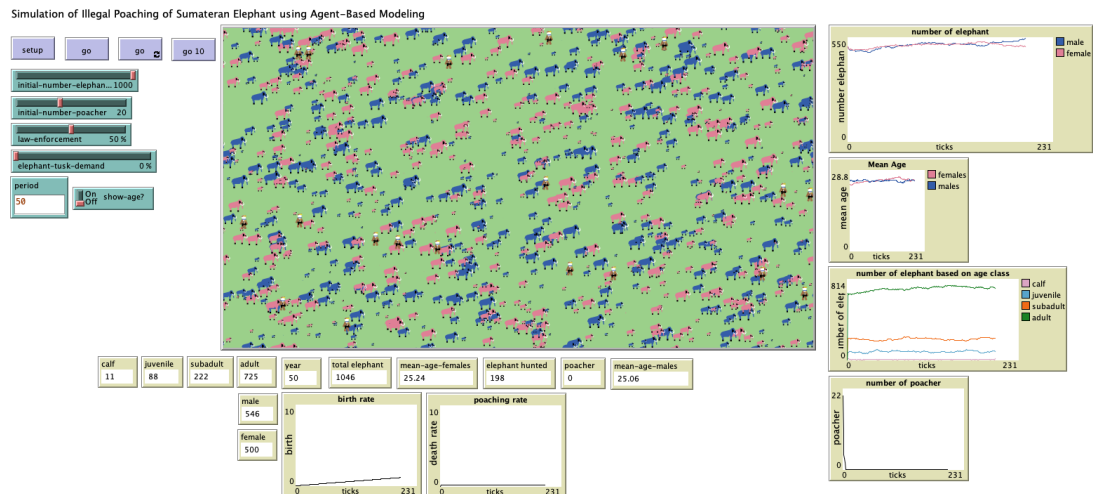
C. Skenario 3

Berikut merupakan hasil yang diperoleh dari simulasi skenario ketiga dengan keketatan peraturan sebesar 25% yang ditunjukkan Gambar 16.



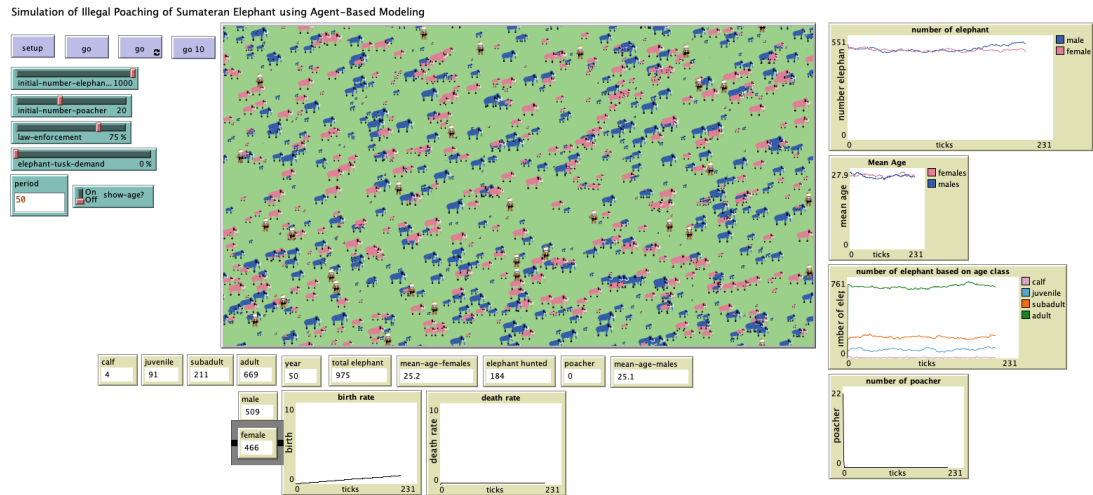
Gambar 16. Simulasi Skenario Ketiga Dengan Keketatan Peraturan Sebesar 25%.

Kemudian ketatatan peraturan dinaikkan menjadi 50% yang ditunjukkan pada Gambar 17. Hasil menunjukkan bahwa terdapat kenaikan jumlah Gajah dan kematian yang semakin menurun.



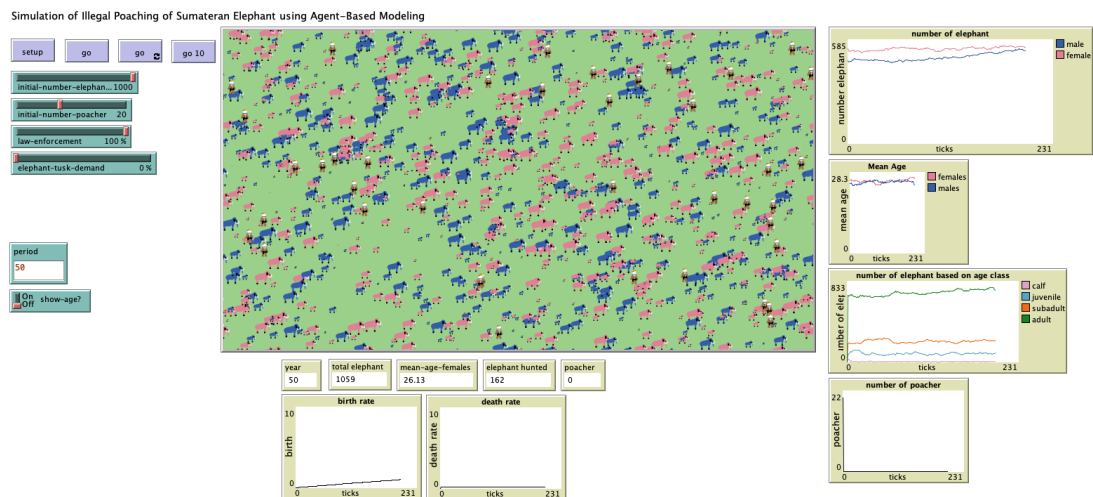
Gambar 17. Simulasi Skenario Ketiga Dengan Keketatan Peraturan Sebesar 50%.

Setelah itu percobaan dilanjutkan dengan meningkatkan keketatan peraturan menjadi 75% dengan penjagaan ketat dan peraturan yang berdampak bagi keberlangsungan populasi gajah. Hasil ditunjukkan pada Gambar 18.



Gambar 18. Simulasi Skenario Ketiga Dengan Keketatan Peraturan Sebesar 75%.

Bagaimana jika peraturan sangat ketat hingga 100%, apakah berdampak pada kenaikan populasi gajah dan menurunnya konflik, hasil ditunjukkan pada Gambar 19. Kemudian data hasil simulasi dirangkum pada Tabel



Gambar 19. Simulasi Skenario Ketiga Dengan Keketatan Peraturan Sebesar 100%.

Tabel 5. Data Simulasi dengan Keketatan Peraturan Sebesar 25% dan 50%.

	25% (5.5)		50% (1.25)	
	Awal	Akhir	Awal	Akhir
Jumlah Gajah	1000	873	1000	1046
Gajah Betina	502	442	500	500
Gajah Jantan	498	431	500	546

Bayi Gajah	21	3	12	11
Gajah Muda	88	49	79	88
Gajah Sub-dewasa	200	209	219	222
Gajah Dewasa	673	612	671	725
Rata-rata usia gajah jantan	24.57	24.9	25.4	25.06
Rata-rata usia gajah betina	25.14	24.75	23.84	25.24
Gajah yang mati	0	714	0	198

Tabel 6. Data Simulasi dengan Keketatan Peraturan Sebesar 75% dan 100%.

	75% (0.75)		100% (0.5)	
	Awal	Akhir	Awal	Akhir
Jumlah Gajah	1000	975	1000	1018
Gajah Betina	499	466	506	495
Gajah Jantan	501	509	494	523
Bayi Gajah	19	4	16	5
Gajah Muda	76	91	70	78
Gajah Sub-dewasa	180	211	212	216
Gajah Dewasa	692	669	674	719
Rata-rata usia gajah jantan	26.52	25.1	25.02	25.04
Rata-rata usia gajah betina	25.4	25.2	26.18	25.43
Gajah yang mati	0	184	0	141

IV.II Pembahasan

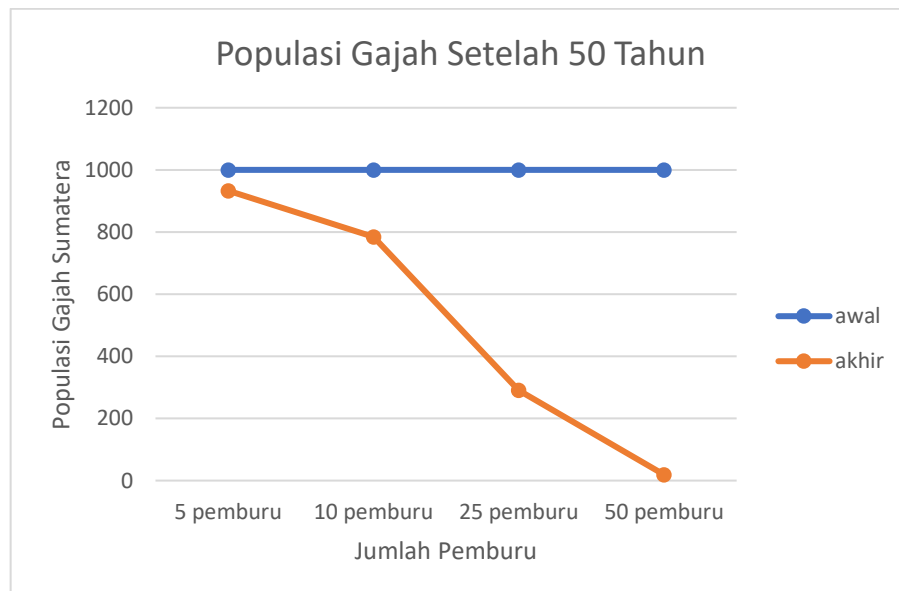
Pada skenario pertama dilakukan percobaan dengan melihat populasi gajah dalam rentang 50 tahun. Keketatan peraturan dibuat menjadi 0%, tidak terjaga dan sering terjadi konflik. Berdasarkan data yang telah didapat dari Gambar 9, bahwa populasi gajah yang tersisa hanya mencapai 200 individu. Sebaran gajah betina dan gajah jantan berada di satu garis lurus yang sama, akan tetapi gajah jantan yang lebih sedikit di banding gajah betina.

Kemudian populasi gajah dianalisis berdasarkan umur setelah 50 tahun, berdasarkan data yang telah didapat dari Gambar 10. Grafik menunjukkan bahwa pertumbuhan gajah muda atau bayi gajah mengalami penurunan drastis sehingga tidak ada pertumbuhan gajah menjadi lebih besar. Sama juga dengan gajah remaja atau juvenile yang berada di bawah rata-rata. Berbanding sangat jauh dengan gajah yang sudah dewasa dan memasuki umur maksimum yang menunjukkan tidak adanya kegiatan reproduksi pada masa itu. Pada tingkat subadult atau gajah yang siap untuk bereproduksi tidak dapat mencapai tingkat yang lebih tinggi, keadaan ini didukung dengan berkurangnya populasi gajah remaja. Sehingga jika skenario 1 terjadi di kehidupan populasi gajah saat ini akan mengakibatkan kiamat gajah Sumatera yang tidak akan lagi gajah yang dapat berkembang biak, dan berkurangnya gajah pejantan.

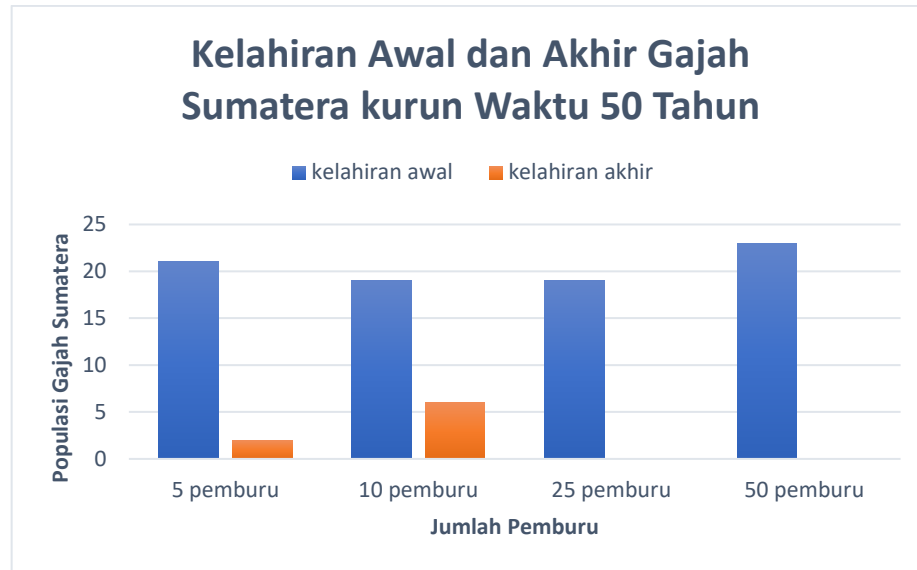
Pada skenario 2 dilakukan analisis pada pertumbuhan populasi terhadap pertumbuhan pemburu, apakah gajah Sumatera dapat bertahan atau akan terancam punah. Jumlah Pemburu divariasikan dari 5, 10, 25 dan 50 individu. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan Tabel 3, bahwa penurunan populasi ditandai dengan semakin besar angka kematian gajah, kecilnya kelahiran gajah baru. Skenario ini dapat mempercepat kiamat gajah Sumatera. Pemburu yang dideskripsikan tidak hanya semata hanya sebagai pembunuhan tetapi juga konflik yang dengan manusia yang dapat mengakibatkan gajah mati dengan alami. Pada pemburu yang berjumlah 5 individu dengan inisialisasi jumlah gajah sebanyak 1000 individu, setelah dilakukan simulasi kematian gajah meningkat hingga 777 individu, dan kelahiran gajah hanya mencapai 2 individu yang semulanya 21 individu. Akan

tetapi jumlah gajah akhir yang tersisa mencapai 933 individu, artinya perkembangan biakan gajah signifikan cukup stabil. Melihat angka kematian gajah yang diakibatkan oleh 5 pemburu menjadi persoalan untuk mengambil langkah proteksi gajah lebih ketat dan terjaga lagi. Setelah itu dengan 10 pemburu ditemukan gajah yang masih hidup 784 individu, penurunan ini juga ditandai dengan kematian gajah secara alami dan non alami sebanyak 2802, dan kelahiran gajah yang terakhir hanya 2 individu per tahunnya. Ancaman ini akan menjadi serius setelah 50 tahun lamanya.

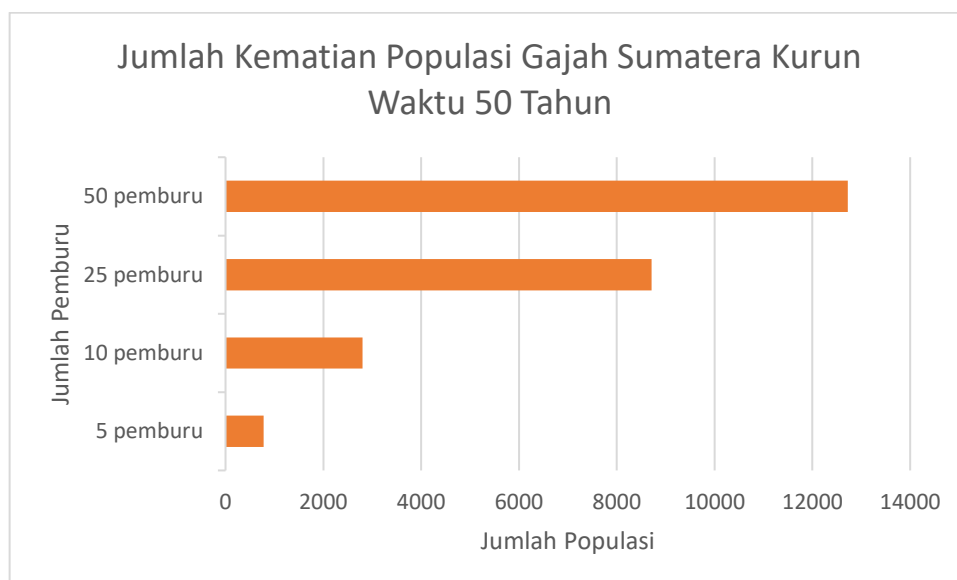
Selanjutnya pada pemburu dengan jumlah 25 individu dan 50 individu menunjukkan angka kematian yang fantastis secara perlahan. Ditandai dengan jumlah kematiannya mencapai 8711 dan 12.727 ribu individu. Skenario ini sangat tidak ingin kan terjadi di kehidupan saat ini akan tetapi menjadi potensi besar jika tidak ada perubahan terhadap perlindungan gajah dan habitatnya. Grafik populasi gajah setelah 50 tahun terhadap pertumbuhan pemburu ditunjukkan pada Gambar 20. Sedangkan grafik kelahiran dan kematian gajah di awal dan akhir setelah 50 tahun ditunjukkan pada Gambar 21 dan 22.



Gambar 20. Grafik Populasi Gajah Terhadap Pertumbuhan Pemburu.



Gambar 21. Grafik Jumlah Kelahiran Awal dan Akhir Populasi Setelah 50 Tahun Terhadap Pertumbuhan Pemburu.



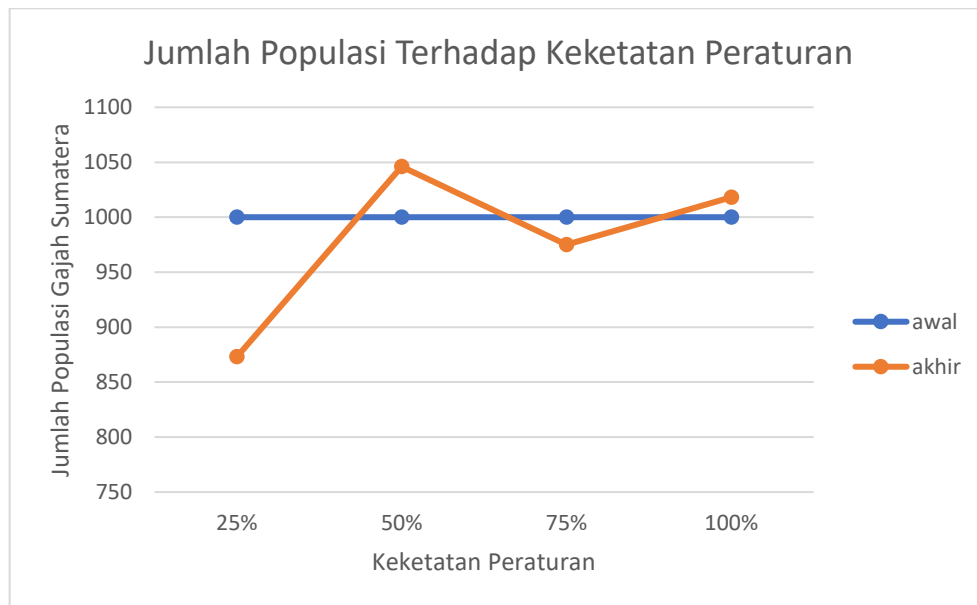
Gambar 22. Grafik Jumlah Kematian Populasi Gajah Sumatera dalam Kurun Waktu 50 Tahun terhadap Jumlah Pemburu.

Pada skenario ketiga, diambil langkah keketatan peraturan untuk melindungi gajah Sumatera dan habitatnya, dengan jumlah populasi dijaga tetap yaitu 1000 individu dan jumlah pemburu sebanyak 20 individu. Tingkat keberhasilan peraturan dibuat bervariasi dari 25%, 50%, 75% dan 100% dalam kurun waktu 50 tahun. Skenario ini dilakukan untuk menganalisis perubahan populasi terhadap tingkat peraturan yang dibuat semakin ketat dan pengawasan hutan yang tertib. Berdasarkan data yang telah dikumpulkan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5

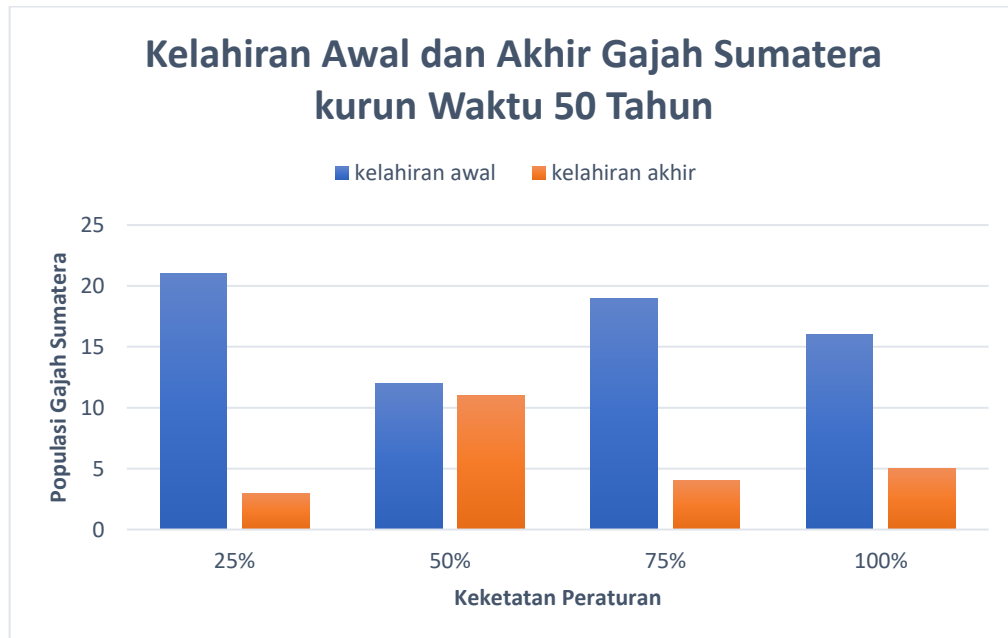
dan 6, bahwa kematian akhirnya menurun dan tingkat kelahiran meningkat. Pada tingkat 25%, jumlah populasi akhir mencapai 873 individu. Dibandingkan dengan jumlah pemburu 25 individu pada skenario sebelumnya menunjukkan terjaganya kelahiran gajah Sumatera dengan menerapkan keketatan peraturan. Jumlah kelahiran awal dan akhir adalah 21 dan 3 individu. Lalu jumlah kematian gajah mencapai 714 individu. Ketika keketatan peraturan dinaikkan menjadi 50%, jumlah populasi akhir gajah menjadi 1046 individu. Keberhasilan peraturan ditunjukkan dengan bertambahnya populasi gajah sebanyak 46 individu, ditandai dengan jumlah kelahiran awal dan akhir yang meningkat juga, yaitu 12 dan 11 individu. Sedangkan jumlah kematian gajah menjadi 198 individu, padahal jumlah pemburu berada di angka 20 pemburu, artinya walau peraturan meningkat akan tetap sama terjadi konflik dan pemburuan seperti sebelumnya. Selanjutnya pada tingkat keketatan peraturan menjadi 75%, jumlah populasi menjadi 975 individu. Karena pemburu dijaga tetap kemungkinan konflik yang terjadi signifikan mempengaruhi adaptasi gajah terhadap habitatnya, karena peraturan menjadi sangat tertata dan membatasi ruang kantung populasi dan perpindahan populasi satu ke populasi lainnya mengakibatkan penurunan populasi akhir, juga terjadinya erosi ekologi. Sementara angka kelahiran awal dan akhir adalah 19 dan 4 individu. Jumlah kematian menjadi sangat sedikit hanya mencapai 185 individu.

Bagaimana jika peraturan dibuat sangat ketat hingga 100%. Hal ini justru mengakibatkan gajah Sumatera sangat dikendalikan dan pemburu yang diterapkan memiliki adaptif yang lebih tinggi karena dapat membaca pola peraturan yang dibuat, sehingga populasi akhir gajah tidak signifikan naik dalam 50 tahun yaitu 1018 individu. Akan tetapi hasil ini lebih baik dibandingkan dengan keketatan sebelumnya. Walau jumlah kelahiran awal dan akhir menjadi menurun dari 16 menjadi 5 individu. Kemudian jumlah kematian gajah lebih kecil dari sebelumnya hingga 141 individu. Meskipun keketatan sudah diterapkan sepenuhnya pemburuan gajah belum dapat menunjukkan signifikan keberhasilan menurunkan angka kematian gajah selama 50 tahun. Grafik populasi gajah dengan keketatan peraturan yang dibuat meningkat setelah 50 tahun terhadap pertumbuhan pemburu

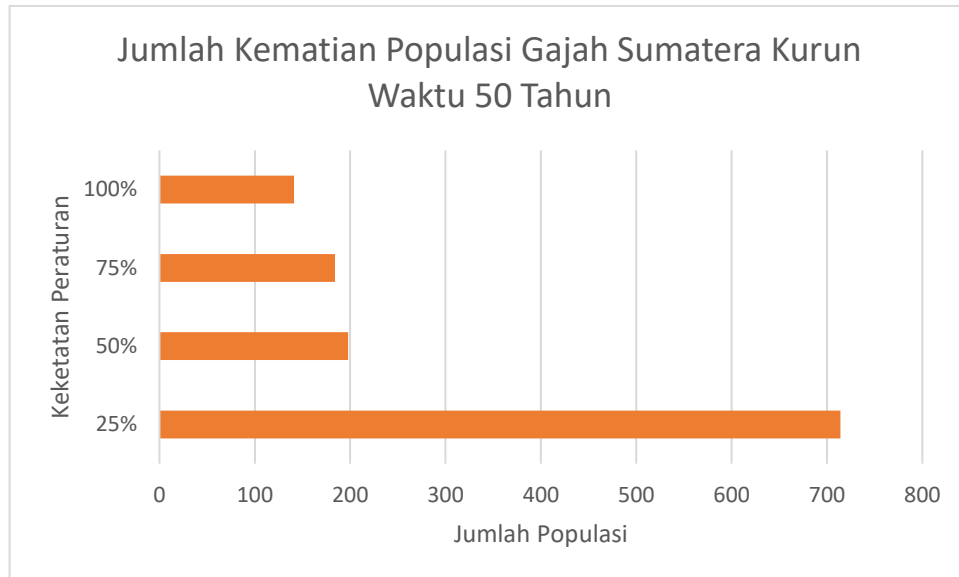
ditunjukkan pada Gambar 23. Sedangkan grafik kelahiran dan kematian gajah di awal dan akhir setelah 50 tahun ditunjukkan pada Gambar 24 dan 25.



Gambar 23. Grafik Pertumbuhan Populasi Gajah Sumatera Terhadap Keketatan Peraturan.



Gambar 24. Grafik Jumlah Kelahiran Awal dan Akhir Populasi Setelah 50 Tahun Terhadap Keketatan Peraturan.



Gambar 25. Grafik Jumlah Kematian Populasi Gajah Sumatera dalam Kurun Waktu 50 Tahun terhadap Tingkat Keketatan Peraturan.

BAGIAN V SIMPULAN DAN SARAN

V.I Simpulan

Berdasarkan hasil dan analisis di atas didapat bahwa:

1. Persebaran gajah berjenis kelamin jantan dan betina dalam kurun waktu 50 tahun adalah seimbang, dengan kondisi peraturan yang tidak ketat dan jumlah pemburu yang tidak ada serta terjadi konflik menunjukkan penurunan drastis kematian dan kelahiran gajah Sumatera.
2. Pada pertumbuhan pemburuan gajah menunjukkan bahwa semakin tinggi nya pemburuan maka tingkat kematian semakin meningkat dan penurunan populasi menjadi sangat turun yang artinya dapat mengakibatkan kepunahan gajah Sumatera.
3. Dengan diberlakukannya tingkat keketatan peraturan dan pengawasan hutan yang tertib dari 25% dan 50% menunjukkan perubahan signifikan pada tingkat kelahiran gajah yang meningkat, sedangkan pada tingkat 75% dan 100% tidak menunjukkan signifikan tingkat kelahiran karena pemburu sudah memiliki adaptasi terhadap pola ketertiban habitat dan konflik yang tidak dapat dihindari yang ditandai dengan kematian gajah yang tidak signifikan

turun, artinya semakin tumbuhnya populasi gajah akan semakin berlangsung besar pula konflik yang mengakibatkan angka kelahiran semakin kecil.

V.II Saran

Terdapat banyak bagian dari simulasi ini yang dapat dikembangkan lebih lanjut agar proses simulasi dapat lebih menyerupai kejadian di dunia nyata sehingga hasil akhirnya lebih sesuai dengan data realitanya. Berikut merupakan beberapa saran yang dapat dipertimbangkan dan bagian-bagian yang dapat dikembangkan pada penelitian selanjutnya.

1. Metode yang digunakan pada simulasi ini tidak begitu spesifik sehingga perbandingan hasil antara beberapa metode simulasi tidak dapat dilakukan. Hal ini disebabkan karena banyak komponen dan parameter dalam simulasi ini masih menggunakan asumsi dan tidak berdasarkan pada data realita atau data historis.
2. Pemberian parameter yang akan mempengaruhi pengambilan keputusan dan perilaku pada masing-masing agen dapat dilakukan sehingga gerakan dan perilaku agen tidak akan homogen dan akan berbeda berdasarkan kondisi yang tengah dihadapi.

BAGIAN VI Daftar Pustaka

- [1] N. Dickinson, "Deforestation and Forest Degradation," *World Wild Life Foundation*, 2022.
- [2] A. Rianti and R. Garsetiasih, "Persepsi masyarakat terhadap gangguan Gajah Sumatera (*Elephas maximus sumatranus*) di Kabupaten Ogan Komering Ilir," *J. Penelit. Sos. dan Ekon. Kehutan.*, vol. 14, no. 2, pp. 83–99, 2017.
- [3] T. Soehartono, *Strategi dan rencana aksi konservasi Gajah Sumatera dan gajah Kalimantan, 2007-2017*. Direktorat Jenderal Perlindungan Hutan dan Konservasi Alam, Departemen . 2007.
- [4] Direktorat Jendral KSDAE, *Rencana Tindakan Mendesak Penyelamatan Populasi Gajah Sumatera (*Elephas Maximus Sumatranus*) 2020-2023*. Jakarta:

Direktorat KKH-KSDAE Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, 2020.

[5] A. Abdullah, A. Asiah, and T. Japisa, “Karakteristik habitat Gajah Sumatera (*Elephas maximus sumatranus*) di kawasan ekosistem Seulawah Kabupaten Aceh Besar,” *J. Biol. Edukasi*, vol. 4, no. 1, pp. 41–45, 2012.

[6] Direktorat Jendral KSDAE, Strategi dan Rencana Aksi Konservasi Gajah Sumatera dan Gajah Kalimantan 2007-2017. Jakarta: Departemen Kehutanan, 2007.

[7] P. Priyambodo, E. L. Rustiati, D. Candra, and S. Asiyah, “PEMBUATAN BANK DNA GAJAH SUMATERA (*Elephas maximus sumatrensis*) DI PUSAT LATIHAN GAJAH TAMAN NASIONAL WAY KAMBAS,” 2017.

[8] S. Hauenstein, M. Kshatriya, J. Blanc, C. F. Dormann, and C. M. Beale, “African elephant poaching rates correlate with local poverty, national corruption and global ivory price,” *Nat. Commun.*, vol. 10, no. 1, p. 2242, 2019, doi: 10.1038/s41467-019-09993-2.

[9] E. Neil, J. K. Madsen, E. Carrella, N. Payette, and R. Bailey, “Agent-based modelling as a tool for elephant poaching mitigation,” *Ecol. Modell.*, vol. 427, p. 109054, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109054>.

[10] T. Filatova, P. H. Verburg, D. C. Parker, and C. A. Stannard, “Spatial agent-based models for socio-ecological systems: Challenges and prospects,” *Environ. Model. Softw.*, vol. 45, pp. 1–7, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.017>.

[11] H. J. Albers, “Spatial modeling of extraction and enforcement in developing country protected areas,” *Resour. Energy Econ.*, vol. 32, no. 2, pp. 165–179, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2009.11.011>.

[12] H. HOFER, K. L. I. CAMPBELL, M. L. EAST, and S. A. HUIISH, “MODELING THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE ECONOMIC COSTS AND BENEFITS OF ILLEGAL GAME MEAT HUNTING IN THE SERENGETI,” *Nat. Resour. Model.*, vol. 13, no. 1, pp. 151–177, Mar. 2000, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1939-7445.2000.tb00031.x>.

- [13] H. Xu *et al.*, “Optimal Patrol Planning for Green Security Games with Black-Box Attackers BT - Decision and Game Theory for Security,” 2017, pp. 458–477.
- [14] N. D. Yudarini, I. G. Soma, and S. Widyastuti, “Tingkah laku harian Gajah Sumatera (*elephas maximus sumatranus*) di bali safari and marine park, gianyar,” *Indones. Med. Veterinus*, vol. 2, no. 4, pp. 461–468, 2013.
- [15] D. DJUFRI, “Natural food monitoring of Sumatran elephant (*Elephas maximus sumatraensis*) in Taman Hutan Raya Cut Nyaâ€™ Dhién Seulawah, Aceh Besar,” *Biodiversitas J. Biol. Divers.*, vol. 4, no. 2, 2003.
- [16] A. I. Mahanani, “Strategi Konservasi Gajah Sumatera (*Elephas Maximus Sumatranus* Tem-minck) di Suaka Margasatwa Padang Sugihan Provinsi Sumatera Selatan Berdasarkan Daya Dukung Habitat,” *Univ. Diponegoro*, 2012.
- [17] N. Suhada, D. Yoza, and T. Arlita, “Habitat Optimal Gajah Sumatera (*Elephas maximus sumatranus* Temminck.) Di Pusat Latihan Gajah (PLG) Minas.” Riau University, 2016.
- [18] R. Rusita, I. G. Febryano, S. B. Yuwono, and I. S. Banuwa, “Potensi hutan rawa air tawar sebagai alternatif ekowisata berbasis konservasi Gajah Sumatera (*Elephas maximus sumatranus*),” *J. Pengelolaan Sumberd. Alam dan Lingkung. (Journal Nat. Resour. Environ. Manag.*, vol. 9, no. 2, pp. 498–506, 2019.
- [19] R. Fadillah, D. Yoza, and E. Sribudiani, “Sebaran dan Perkiraan Produksi Pakan Gajah Sumatera (*Elephas maximus sumatranus* temminck.) di Sekitar Duri Kecamatan Mandau Kabupaten Bengkalis.” Riau University, 2014.
- [20] R. K. Tohir, “Pengelolaan dan tingkat kesejahteraan Gajah Sumatera (*Elephas maximus sumatranus*) di Flying Squad WWF Taman Nasional Tesso Nilo,” 2016.
- [21] M. A. Wardani, “Perilaku dan Aktivitas Menggaram Gajah Sumatera (*Elephas maximus sumatranus*) di Pusat Latihan Gajah Way Kambas”.
- [22] H. S. Alikodra and Z. Nasution, “Evaluation on Habitat Suitability Index of Sumatran Elephant (*Elephas maximus sumatranus*) In Jantho Pinus Nature Reserve, Aceh”.
- [23] S. Hedges, M. J. Tyson, A. F. Sitompul, M. F. Kinnaird, and D. Gunaryadi, “Distribution, status, and conservation needs of Asian elephants

(*Elephas maximus*) in Lampung Province, Sumatra, Indonesia,” *Biol. Conserv.*, vol. 124, no. 1, pp. 35–48, 2005.

[24] D. Helbing, “Agent-based modeling,” in *Social self-organization*, Springer, 2012, pp. 25–70.

[25] S. C. Banks, “Agent-based modeling: A revolution?,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 99, no. suppl 3, pp. 7199–7200, 2002.