

KONTROL OPTIMAL MODEL MATEMATIKA PADA PENYEBARAN JUDI ONLINE DI INDONESIA

Muh. Ishaq Firdaus¹, Syafruddin Side², Muhammad Abdy³

Jurusan Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Makassar ^{1,2,3},

Email: 250027301012@student.unm.ac.id¹, syafruddin@unm.ac.id²,
muh.abdy@unm.ac.id³

Corresponding Author: Syafruddin Side, **E-mail:** syafruddin@unm.ac.id

Abstrak. Penyebaran judi online di Indonesia memerlukan pendekatan pengendalian yang mempertimbangkan dinamika perilaku masyarakat dan sumber daya intervensi. Penelitian ini bertujuan menganalisis penerapan kontrol optimal berupa edukasi digital untuk mengurangi aktivitas judi online menggunakan model SGQ. Populasi dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu individu rentan terlibat judi online (S), individu aktif berjudi (G), dan individu yang berhenti atau menghindari judi online (Q). Model diselesaikan menggunakan metode *forward-backward sweep* dengan integrasi Runge–Kutta orde empat (RK4) selama 100 tahun. Kebaruan penelitian ini terletak pada pemodelan edukasi digital dengan efektivitas berbeda terhadap kelompok rentan dan kelompok aktif berjudi, sehingga strategi intervensi dapat dianalisis secara lebih spesifik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontrol optimal mampu menekan puncak dan akumulasi proporsi individu aktif berjudi, dengan penurunan akumulasi sebesar 45.05% dibandingkan skenario tanpa kontrol. Intensitas intervensi optimal cenderung lebih tinggi pada awal periode dan menurun seiring waktu. Temuan ini menunjukkan bahwa edukasi digital berpotensi menjadi strategi pengendalian judi online, meskipun validasi menggunakan data empiris dan analisis sensitivitas lebih lanjut diperlukan untuk mendukung penerapannya dalam kebijakan.

Kata Kunci: Judi Online, Model SGQ, Kontrol Optimal, Edukasi Digital, Forward-Backward Sweep.

Abstract. The spread of online gambling in Indonesia requires control strategies that account for behavioral dynamics and intervention resources. This study aims to analyze the application of optimal control through digital education to reduce online gambling activity using the SGQ model. The population is divided into three groups: individuals susceptible to online gambling (S), individuals actively engaged in online gambling (G), and individuals who have quit or avoid online gambling (Q). The model is solved using the forward-backward sweep method with fourth-order Runge–Kutta (RK4) integration over a 100-year simulation period. The novelty of this study lies in modeling digital education with distinct effectiveness coefficients for susceptible individuals and active gamblers, allowing intervention strategies to be evaluated separately for each group. Simulation results indicate that optimal control reduces both the peak and cumulative proportion of active gamblers, with a 45.05% reduction in cumulative gambling activity compared with the uncontrolled scenario. The optimal intervention intensity is higher at the beginning of the simulation and gradually decreases over time. These findings suggest that digital education has the potential to serve as a strategy for controlling online gambling activity. However, empirical validation and further sensitivity analysis are required to strengthen the model's applicability to policymaking.

Keywords: Online Gambling, SGQ Model, Optimal Control, Digital Education, Forward-Backward Sweep.

A. Pendahuluan

Perkembangan teknologi digital telah memperluas jangkauan aktivitas masyarakat melalui internet, termasuk akses terhadap perjudian daring (Yasmine et al., 2025). Asosiasi Penyelenggara Jasa Internet Indonesia (APJII) melaporkan bahwa jumlah pengguna internet di Indonesia pada tahun 2024 mencapai 221.563.479 jiwa dengan tingkat penetrasi sebesar 79,5%. Angka tersebut meningkat dibandingkan penetrasi tahun 2023 sebesar 78,19% (APJII, 2024). Besarnya populasi pengguna internet menunjukkan luasnya ruang interaksi digital yang dapat dimanfaatkan untuk penyebaran informasi maupun promosi perjudian. Kondisi ini menjadi



dasar penting untuk mengkaji dinamika penyebaran judi online dan merumuskan strategi pengendalian yang sesuai dengan karakteristik masyarakat digital.

Pusat Pelaporan dan Analisis Transaksi Keuangan (PPATK, 2025) mencatat bahwa jumlah pemain judi online di Indonesia pada tahun 2024 mencapai 16.381.384 orang. Sementara itu, PPATK (2026) melaporkan bahwa sebanyak 12,3 juta orang melakukan deposit judi online sepanjang tahun 2025. Data tersebut menunjukkan bahwa aktivitas judi online masih melibatkan jutaan orang di Indonesia. Namun, kedua angka tersebut perlu dipahami berdasarkan perbedaan indikator pendataannya, karena data tahun 2025 secara khusus merujuk pada orang yang melakukan deposit. Oleh karena itu, data tersebut menggambarkan besarnya skala persoalan judi online yang masih memerlukan perhatian serius melalui upaya pencegahan dan pemberantasan yang berkelanjutan.

Penerapan model kompartemen pada perilaku adiktif telah dilakukan oleh Side *et al.* (2020) melalui model SIR untuk menganalisis kecanduan penggunaan media sosial pada mahasiswa dengan mempertimbangkan kelompok yang berpotensi menggunakan media sosial, kelompok yang mengalami kecanduan, dan kelompok yang memiliki kontrol diri tinggi. Sementara itu, Kong *et al.* (2021) mengembangkan model *susceptible–hesitator–gambler–disclaimer* pada jaringan bebas skala untuk mengkaji faktor psikologis, kebijakan antijudi, dan heterogenitas hubungan sosial. Mereka menganalisis ambang serta kestabilan dinamika perjudian. Penelitian ini mengadaptasi pendekatan tersebut melalui model SGQ dengan menambahkan kontrol optimal berupa edukasi digital untuk menganalisis strategi pengendalian judi online.

Analisis dinamika populasi perlu dilengkapi dengan pendekatan yang dapat menentukan intensitas intervensi sepanjang periode pengendalian. Dalam penelitian ini, edukasi digital diposisikan sebagai variabel kontrol untuk merepresentasikan upaya meningkatkan pemahaman masyarakat mengenai risiko judi online dan mendukung perubahan perilaku. Pengaruh edukasi terhadap perpindahan antarkelompok dirumuskan sebagai asumsi matematis yang akan dievaluasi melalui simulasi. Perumusan tersebut memungkinkan pengkajian skenario intervensi, sedangkan besarnya pengaruh edukasi dalam kondisi nyata tetap memerlukan dukungan data empiris.

Penentuan intervensi memerlukan pertimbangan terhadap intensitas pelaksanaan dan sumber daya yang digunakan. Teori kontrol optimal menyediakan pendekatan matematis untuk menentukan fungsi intervensi yang berubah sepanjang waktu berdasarkan tujuan pengendalian. Resmawan *et al.* (2020) menerapkan kontrol edukasi pada model penyebaran pengguna narkoba menggunakan *Prinsip Minimum Pontryagin* dan simulasi *Runge-Kutta* orde empat. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontrol edukasi dapat mengurangi kelompok pengguna narkoba pada skenario model yang dianalisis. Penelitian tersebut memberikan dasar metodologis untuk mengembangkan pengendalian berbasis edukasi pada persoalan perilaku lainnya, dengan tetap memperhatikan perbedaan mekanisme dan karakteristik populasi sasaran.

Ruang pengembangan yang menjadi fokus penelitian ini terletak pada integrasi dinamika model SGQ dengan penentuan kontrol edukasi digital yang berubah terhadap waktu. Model kompartemen dapat menjelaskan perkembangan perilaku, sedangkan pendekatan kontrol optimal memungkinkan penentuan strategi intervensi dengan mempertimbangkan tujuan pengurangan individu aktif berjudi dan biaya pelaksanaan kontrol. Integrasi tersebut diperlukan karena peningkatan intensitas intervensi melibatkan penggunaan sumber daya. Strategi optimal ditentukan berdasarkan fungsi tujuan, batas kontrol, parameter, dan periode pengendalian yang ditetapkan dalam model.

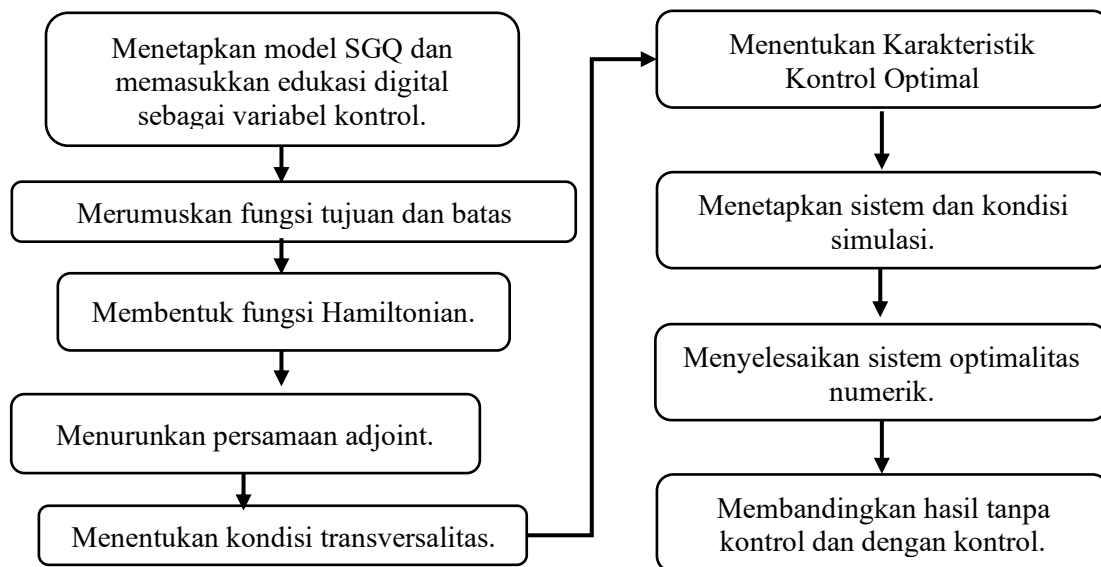
Penelitian ini menggunakan model *Susceptible–Gambling–Quit* (SGQ). Populasi dibagi menjadi kelompok individu rentan, individu aktif berjudi, serta individu yang menghindari atau telah berhenti berjudi. Edukasi digital dinyatakan sebagai variabel kontrol yang memengaruhi perpindahan dari kelompok rentan dan kelompok aktif menuju kelompok yang tidak aktif



berjudi. Tujuan penelitian adalah merumuskan karakterisasi kontrol optimal menggunakan *Prinsip Minimum Pontryagin* serta membandingkan dinamika populasi dengan dan tanpa kontrol melalui simulasi numerik. Penelitian ini diharapkan menghasilkan kerangka analitis untuk pengkajian penjadwalan edukasi digital dalam pengendalian judi online di Indonesia, dengan interpretasi yang tetap bergantung pada asumsi dan parameter model.

B. Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain penelitian kuantitatif dengan pendekatan pemodelan matematika terapan untuk merumuskan, menganalisis, dan mensimulasikan kontrol optimal model SGQ pada penyebaran judi online di Indonesia. Data sekunder bersumber dari publikasi Asosiasi Penyelenggara Jasa Internet Indonesia (APJII), Pusat Pelaporan dan Analisis Transaksi Keuangan (PPATK) dan Badan Pusat Statistik (BPS). Data tersebut digunakan sebagai dasar penetapan kondisi awal, sedangkan parameter model ditentukan berdasarkan literatur dan asumsi penelitian. Variabel penelitian terdiri atas *Susceptible* (S), *Gambling* (G), dan *Quit* (Q), yang masing-masing mewakili individu yang berpotensi terlibat dalam judi online, individu yang aktif melakukan judi online, serta individu yang menghindari atau telah berhenti melakukan judi online. Model dirumuskan sebagai sistem persamaan diferensial biasa nonlinier berdasarkan asumsi mengenai dinamika populasi dan perpindahan antarkompartemen. Selanjutnya, edukasi digital dimasukkan sebagai variabel kontrol untuk meminimumkan akumulasi proporsi individu aktif berjudi dan penalti intensitas intervensi. Kontrol optimal dianalisis menggunakan *Prinsip Minimum Pontryagin*, sedangkan sistem optimalitas diselesaikan secara numerik melalui metode *forward-backward sweep* dengan integrasi *Runge-Kutta* orde empat. Untuk memberikan gambaran mengenai tahapan penelitian, berikut disajikan diagram alur penelitian pada Gambar 1.



Gambar 1 Desain Penelitian

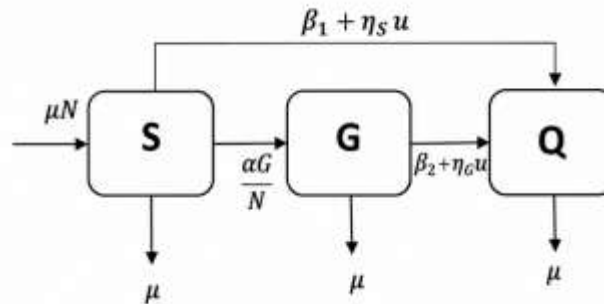
C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

1. Model SGQ dengan Kontrol Edukasi Digital

Pengendalian penyebaran judi online dilakukan dengan memasukkan edukasi digital sebagai variabel kontrol (u) dalam model SGQ. Intervensi ini ditujukan kepada kelompok individu yang rentan terlibat dalam judi online (S) dan kelompok individu yang aktif berjudi (G). Namun, efektivitas edukasi digital pada kedua kelompok tidak diasumsikan identik. Pada kelompok (S), edukasi digital berperan sebagai upaya pencegahan untuk meningkatkan



kesadaran mengenai risiko judi online dan mengurangi kemungkinan keterlibatan dalam aktivitas tersebut. Sementara itu, pada kelompok (G), edukasi digital diarahkan untuk mendorong penghentian aktivitas judi online dan perpindahan menuju kelompok individu yang berhenti berjudi (Q). Perbedaan mekanisme intervensi tersebut direpresentasikan melalui koefisien efektivitas yang berbeda, yaitu (η_s) untuk kelompok (S) dan (η_g) untuk kelompok (G). Dengan demikian, variabel kontrol (u) merepresentasikan intensitas intervensi edukasi digital, sedangkan (η_s) dan (η_g) menggambarkan efektivitas intervensi pada masing-masing kelompok. Diagram perpindahan antarkelompok dalam model SGQ dengan intervensi edukasi digital disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2 Diagram Model SGQ

Keterangan:

- S = Populasi yang berpotensi terpapar perilaku judi online.
- G = Populasi yang secara aktif terlibat dalam aktivitas judi online.
- Q = Populasi yang berhenti berjudi dan individu yang berhasil menghindari keterlibatan.
- N = Total populasi.
- μ = Laju masuk dan keluarnya pengguna internet dari populasi.
- α = Laju perpindahan individu dari populasi S ke populasi G akibat paparan, pengaruh, atau interaksi dengan individu yang aktif melakukan judi online.
- β_1 = Laju perpindahan individu dari populasi G ke populasi Q akibat kesadaran diri dan kemauan individu untuk berhenti dari aktivitas judi online.
- β_2 = Laju perpindahan individu dari populasi S secara langsung ke populasi Q akibat kesadaran diri dan kemauan individu untuk menghindari aktivitas judi online.
- u = Variabel kontrol.
- η_s = Koefisien efektivitas edukasi digital pada kelompok rentan (S).
- η_g = Koefisien efektivitas edukasi digital pada kelompok aktif berjudi.

Berdasarkan Gambar 2 maka diperoleh Persamaan (1) yang dinyatakan dalam bentuk sistem persamaan diferensial, di mana N mewakili jumlah populasi keseluruhan. Selanjutnya, dilakukan normalisasi dengan mengubah setiap subpopulasi menjadi proporsi dari jumlah populasi keseluruhan. Normalisasi ini didasarkan pada asumsi bahwa jumlah populasi keseluruhan konstan karena laju masuk dan keluarnya pengguna internet dari populasi sama.

$$\begin{aligned}
 s &= \frac{S}{N}, g = \frac{G}{N}, q = \frac{Q}{N} \\
 \frac{ds}{dt} &= \mu - (\alpha g + \beta_1 + \mu + \eta_s u)s \\
 \frac{dg}{dt} &= \alpha s g - (\beta_2 + \mu + \eta_g u)g \\
 \frac{dq}{dt} &= (\beta_1 + \eta_s u)s + (\beta_2 + \eta_g u)g - \mu q
 \end{aligned} \tag{1}$$

dengan $s(t) + g(t) + q(t) = 1$ dan $0 \leq u(t) \leq 1$.

2. Fungsi Tujuan dan Batas Kontrol

Kontrol ditentukan untuk meminimumkan akumulasi proporsi individu aktif berjudi serta



biaya penerapan edukasi digital selama periode pengamatan. Fungsi tujuan dirumuskan sebagaimana Persamaan (2).

$$J(u) = \int_0^T \left[A_1 g(t) + \frac{1}{2} C_u u^2(t) \right] dt \quad (2)$$

dengan $C_u > 0$ merupakan bobot biaya intervensi edukasi digital dan T merupakan waktu akhir pengamatan. Fungsi tujuan pada Persamaan (2) meminimumkan proporsi individu aktif berjudi (g) dan biaya edukasi digital. Bobot (A_1) menunjukkan prioritas pengurangan aktivitas judi online, sedangkan (C_u) mengatur penalti biaya kontrol yang berbentuk kuadrat untuk merepresentasikan peningkatan biaya seiring intensitas intervensi.

3. Formulasi Hamiltonian dan Persamaan Adjoint

Hamiltonian H menggabungkan fungsi tujuan dan dinamika sistem dengan menggunakan variabel *adjoint* (λ), sehingga diperoleh fungsi hamiltonian pada Persamaan (3).

$$\begin{aligned} H = A_1 g + \frac{1}{2} C_u u^2 + \lambda_s [\mu - (\mu + \alpha g + \beta_1) s - \eta_s u s] \\ + \lambda_g [\alpha s g - (\mu + \beta_2) g - \eta_g u g] \\ + \lambda_q [\beta_1 s + \beta_2 g - \mu q + \eta_s u s + \eta_g u g] \end{aligned} \quad (3)$$

Variabel λ_s, λ_g , dan λ_q merupakan variabel *adjoint* yang berkaitan dengan pengaruh perubahan masing-masing kelompok terhadap fungsi tujuan.

Persamaan *adjoint* diperoleh dari hubungan $\dot{\lambda}_i = -\frac{\partial H}{\partial x_i}$, sehingga diperoleh Persamaan (4).

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_s &= (\mu + \alpha g + \beta_1 + \eta_s u) \lambda_s - \alpha g \lambda_g - (\beta_1 + \eta_s u) \lambda_q \\ \dot{\lambda}_g &= -A_1 + \alpha s \lambda_s - [\alpha s - (\mu + \beta_2 + \eta_g u)] \lambda_g - (\beta_2 + \eta_g u) \lambda_q \\ \dot{\lambda}_q &= \mu \lambda_q \end{aligned} \quad (4)$$

Karena fungsi tujuan tidak memuat biaya terminal dan nilai *state* pada waktu akhir tidak ditetapkan, kondisi transversalitas diberikan oleh Persamaan (5).

$$\lambda_s(T) = \lambda_g(T) = \lambda_q(T) = 0 \quad (5)$$

4. Karakteristik Kontrol Optimal

Kondisi stasioner diperoleh dengan menurunkan Hamiltonian terhadap kontrol, sebagaimana Persamaan (6).

$$\frac{\partial H}{\partial u} = C_u u - \eta_s s (\lambda_s - \lambda_q) - \eta_g g (\lambda_g - \lambda_q) = 0 \quad (6)$$

Sehingga kontrol optimal sebelum diberlakukan batas kontrol ditunjukkan pada Persamaan (7).

$$u = \frac{\eta_s s (\lambda_s - \lambda_q) + \eta_g g (\lambda_g - \lambda_q)}{C_u} \quad (7)$$

Dengan memperhatikan batas $0 \leq u(t) \leq 1$ karakterisasi kontrol optimal menjadi Persamaan (8). Batas atas 1 dipilih sebagai normalisasi intensitas edukasi digital, dengan ($u = 0$) menunjukkan tidak adanya intervensi dan ($u = 1$) menunjukkan intensitas maksimum yang diasumsikan dalam model. Eksistensi kontrol optimal dapat dijamin berdasarkan kriteria Fleming–Rishel apabila himpunan kontrol kompak dan konveks, dinamika sistem memenuhi kondisi keteraturan yang sesuai, serta fungsi biaya memenuhi syarat konveksitas terhadap kontrol (Fleming & Rishel, 1975).

$$u^*(t) = \min \left\{ 1, \max \left\{ 0, \frac{\eta_s s (\lambda_s - \lambda_q) + \eta_g g (\lambda_g - \lambda_q)}{C_u} \right\} \right\} \quad (8)$$

Proyeksi pada interval $[0,1]$ menghasilkan kontrol yang meminimumkan Hamiltonian untuk nilai *state* dan *adjoint* yang diberikan. Sistem tersebut merupakan kondisi perlu optimalitas menurut *Prinsip Minimum Pontryagin*.



5. Simulasi Model Matematika SGQ dengan Kontrol Optimal Sistem dan Kondisi Simulasi

Sistem optimalitas terdiri atas persamaan *state* pada Persamaan (1), persamaan *adjoint* pada Persamaan (4), kondisi transversalitas pada Persamaan (5), dan karakterisasi kontrol pada Persamaan (8). Simulasi dilakukan selama 100 hari dengan kondisi awal Adapun nilai-nilai variabel dan parameter pada Tabel 1.

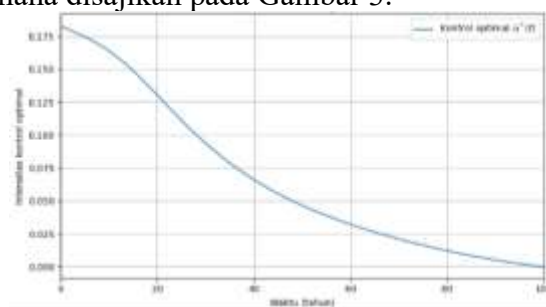
Tabel 1 Nilai Variabel dan Parameter

Variabel / Parameter	Dasar Penetapan	Nilai Awal	Sumber
S	$1 - (G + Q)$	0.933653	APJII (2025)
G	12300000	0.053611	PPATK (2025)
Q	$\frac{229428417}{16381384 - 12300000}$	0.012736	PPATK (2024 dan 2025)
μ	$\frac{229428417}{6.110}$	0.006110	BPS (2025)
α	1000	0.300000	Kong <i>et al.</i> , 2021
β_1	Literatur pembanding	0.000870	Asumsi
β_2	Nilai dasar asumsi	0.100000	Kong <i>et al.</i> , 2021
C_u	Literatur pembanding	5	Asumsi
η_s	Bobot biaya kontrol	0.100000	Asumsi
η_g	Nilai dasar asumsi	0.200000	Asumsi
A_1	Nilai dasar asumsi	1	Asumsi
T	Bobot proporsi	100	Asumsi
	Periode simulasi		

Kondisi awal dan parameter dinamika yang sama digunakan pada skenario tanpa kontrol dan dengan kontrol. Perbandingan tersebut memungkinkan evaluasi perubahan dinamika yang dihasilkan oleh penambahan edukasi digital dalam model.

Penyelesaian Numerik Sistem Optimalitas

Sistem optimalitas diselesaikan menggunakan metode *forward-backward sweep* dengan integrasi Runge–Kutta orde empat (RK4) selama periode simulasi 10 tahun. Ukuran langkah yang digunakan adalah 0,01 tahun dengan total 1.000 langkah waktu. Persamaan state diintegrasikan maju, sedangkan persamaan adjoint diintegrasikan mundur menggunakan kondisi transversalitas. Kontrol diperbarui menggunakan metode rata-rata konveks dengan faktor relaksasi $\theta = 0.5$. Iterasi dihentikan ketika norma maksimum perubahan kontrol ant iterasi kurang dari 10^{-8} , dengan batas maksimum 2.000 iterasi. Berdasarkan simulasi, konvergensi tercapai dalam 21 iterasi dengan galat akhir sebesar 9.489×10^{-9} . Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontrol mencapai nilai tertinggi pada awal periode, kemudian menurun secara bertahap, sebagaimana disajikan pada Gambar 3.



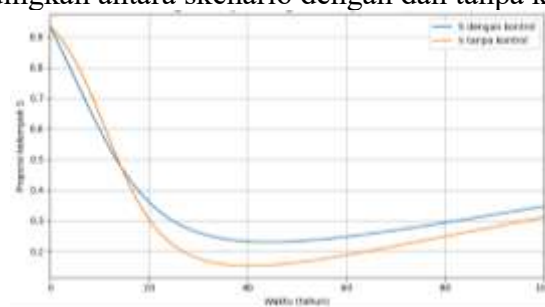
Gambar 3. Grafik kontrol optimal edukasi digital selama 100 tahun

Gambar 3 menunjukkan bahwa intensitas kontrol edukasi digital tertinggi pada awal periode, yaitu $u^* \approx 0.183$, kemudian menurun secara bertahap hingga mencapai nol pada akhir

periode. Pola ini menunjukkan bahwa berdasarkan parameter asumsi yang digunakan, model memilih intensitas edukasi lebih tinggi pada awal intervensi dan menguranginya seiring waktu.

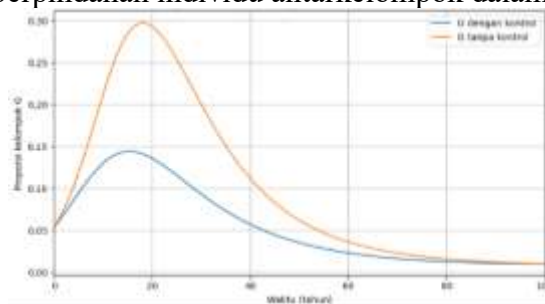
Perbandingan Hasil tanpa Kontrol dan dengan Kontrol

Hasil simulasi dengan kontrol dibandingkan dengan kondisi tanpa kontrol untuk melihat perubahan dinamika masing-masing kelompok dalam model. Grafik berikut menyajikan perbandingan dinamika kelompok (S), (G), dan (Q) tanpa kontrol dan dengan penerapan kontrol. Sebelum membandingkan hasil simulasi dengan kontrol dan tanpa kontrol, dilakukan analisis dasar model tanpa kontrol ($u = 0$) untuk menentukan titik kesetimbangan, bilangan reproduksi dasar, dan kestabilan sistem. Analisis model tanpa kontrol menghasilkan titik kesetimbangan bebas aktivitas judi online $E_0 = (0.875358, 0.124642)$ dengan bilangan reproduksi dasar ($R_0 = 2.4749 > 1$). Kondisi ini menunjukkan bahwa titik kesetimbangan bebas judi online tidak stabil, sehingga kelompok aktif berjudi (G) berpotensi meningkat. Hal ini menjelaskan lonjakan (G) pada simulasi tanpa kontrol. Selanjutnya, dinamika kelompok (S), (G), dan (Q) dibandingkan antara skenario dengan dan tanpa kontrol optimal.



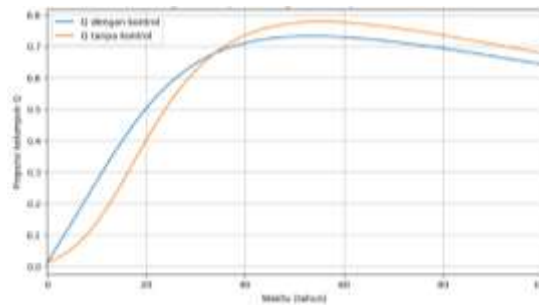
Gambar 4. Perbandingan proporsi kelompok rentan tanpa kontrol dan dengan kontrol optimal

Gambar 4 menunjukkan bahwa proporsi kelompok rentan (S) menurun pada awal simulasi, baik dengan maupun tanpa kontrol. Kelompok (S) dengan kontrol mencapai titik minimum sekitar 0.23 pada tahun ke-44, sedangkan tanpa kontrol mencapai sekitar 0.15 pada tahun ke-40. Setelah itu, proporsi keduanya meningkat secara bertahap hingga tahun ke-100. Secara keseluruhan, kontrol edukasi digital menghasilkan proporsi kelompok (S) yang lebih tinggi pada akhir simulasi dibandingkan tanpa kontrol, yang menunjukkan bahwa intervensi memengaruhi dinamika perpindahan individu antarkelompok dalam model SGQ .



Gambar 5. Perbandingan proporsi individu aktif berjudi tanpa kontrol dan dengan kontrol optimal

Gambar 5 memperlihatkan proporsi kelompok aktif berjudi (G) dengan kontrol mencapai puncak sekitar 0.14 pada tahun ke-15, sedangkan tanpa kontrol mencapai sekitar 0.30 pada tahun ke-18. Hal ini menunjukkan bahwa edukasi digital mampu menekan puncak proporsi individu aktif berjudi hingga lebih dari separuh dibandingkan skenario tanpa kontrol. Setelah mencapai puncak, kedua kurva menurun secara bertahap dan mendekati nilai yang sama pada akhir tahun ke-100. Hasil ini menunjukkan bahwa kontrol edukasi digital terutama efektif dalam mengurangi lonjakan aktivitas judi online pada fase awal hingga pertengahan simulasi.



Gambar 6. Perbandingan proporsi kelompok yang berhenti atau menghindari judi online tanpa kontrol dan dengan kontrol optimal

Gambar 6 menunjukkan proporsi kelompok yang berhenti atau menghindari judi online (Q) meningkat pada kedua skenario. Dengan kontrol, proporsi (Q) meningkat lebih cepat pada awal simulasi dan mencapai puncak sekitar 0.73 pada tahun ke-54. Sementara itu, tanpa kontrol, proporsi (Q) mencapai puncak sekitar 0.78 pada tahun ke-56. Setelah mencapai puncak, kedua kurva menurun secara bertahap hingga tahun ke-100. Hasil ini menunjukkan bahwa edukasi digital mempercepat perpindahan individu menuju kelompok (Q) pada tahap awal, sedangkan nilai (Q) yang lebih tinggi pada skenario tanpa kontrol dipengaruhi oleh dinamika perpindahan alami antarkelompok dalam model.

Perbandingan fungsi tujuan dan hasil akhir disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Perbandingan Fungsi Tujuan dan Hasil Akhir

Indikator	Tanpa kontrol	Dengan kontrol
Fungsi tujuan J	10.071926	7.463264
Akumulasi $\int_0^{100} g(t) dt$	10.071926	5.534506
Proporsi aktif berjudi $g(100)$	0.010277	0.000026
Proporsi berhenti atau menghindari judi $q(100)$	0.678917	0.643517

Berdasarkan hasil simulasi selama 100 tahun, penerapan kontrol edukasi digital menurunkan akumulasi proporsi individu aktif berjudi sebesar sekitar 45,05% dibandingkan skenario tanpa kontrol. Nilai fungsi tujuan juga menurun dari 10.071926 menjadi 7.463264 setelah memperhitungkan biaya intervensi. Meskipun proporsi aktif berjudi pada akhir periode relatif serupa, yaitu 0.010277 tanpa kontrol dan 0.010219 dengan kontrol, hasil ini menunjukkan bahwa efektivitas kontrol lebih terlihat dalam mengurangi akumulasi aktivitas judi online sepanjang periode simulasi daripada pada kondisi akhir.

6. Analisis Sensitivitas Parameter

Tabel 3 Analisis Sensitivitas Parameter

Parameter	Nilai parameter	R_0	Maksimum u^*	Puncak G	Akumulasi $g(t)$	Fungsi tujuan J
μ	0.003055	2.2658	—	—	—	—
μ	0.006110	2.4749	—	—	—	—
μ	0.012220	2.4956	—	—	—	—
β_1	0.000435	2.6393	—	—	—	—
β_1	0.000870	2.4749	—	—	—	—
β_1	0.001740	2.2006	—	—	—	—
C_u	1	—	0.582465	0.060746	1.854840	3.866263
C_u	5	—	0.182962	0.144293	5.534506	7.463264
C_u	10	—	0.096251	0.199198	7.302902	8.567336
C_u	20	—	0.051025	0.240430	8.508947	9.251881
η_s	0.05	—	0.127387	0.200314	7.189909	8.455271
η_s	0.10	—	0.182962	0.144293	5.534506	7.463264
η_s	0.20	—	0.278796	0.089850	3.297531	5.573751



Parameter	Nilai parameter	R_0	Maksimum u^*	Puncak G	Akumulasi $g(t)$	Fungsi tujuan J
η_g	0.10	—	0.182157	0.183556	6.911809	8.357866
η_g	0.20	—	0.182962	0.144293	5.534506	7.463264
η_g	0.40	—	0.183390	0.092963	3.564456	5.906804

Berdasarkan hasil analisis sensitivitas, peningkatan parameter β_1 menurunkan nilai R_0 dari 2.6393 menjadi 2.2006, sedangkan peningkatan μ cenderung meningkatkan R_0 . Pada analisis kontrol optimal, peningkatan C_u dari 1 menjadi 20 menurunkan intensitas kontrol maksimum dari 0.582465 menjadi 0.051025 dan meningkatkan akumulasi aktivitas berjudi. Sebaliknya, peningkatan η_s dan η_g menurunkan puncak serta akumulasi kelompok aktif berjudi (G). Hasil ini menunjukkan bahwa efektivitas edukasi digital dan biaya intervensi berperan penting dalam menentukan keberhasilan pengendalian judi online pada model SGQ.

7. Pembahasan

Penerapan kontrol optimal pada model SGQ menunjukkan bahwa edukasi digital berpotensi menekan aktivitas judi online dalam simulasi 100 tahun. Tanpa kontrol, proporsi individu aktif berjudi mencapai puncak 0.2974 pada tahun ke-18, sedangkan dengan kontrol turun menjadi 0.1443 pada tahun ke-15. Akumulasi proporsi aktif berjudi berkurang sebesar 45.05%, sementara fungsi tujuan menurun sebesar 25.90%. Temuan ini sejalan dengan Resmawan et al. (2020), yang menunjukkan bahwa edukasi dapat mengurangi jumlah pengguna narkoba dalam simulasi matematis, serta Side et al. (2020), yang mengkaji peran pengendalian diri dalam dinamika kecanduan media sosial. Selain itu, Kong et al. (2021) mengembangkan model SHGD (*susceptible–hesitator–gambler–disclaimer*) berbasis jaringan scale-free dan menunjukkan bahwa dinamika penyebaran judi online dipengaruhi oleh kebijakan antijudi dan struktur jaringan sosial. Berbeda dengan model Kong et al. yang menekankan pengaruh jaringan sosial dan kebijakan antijudi, penelitian ini menerapkan kontrol optimal berupa edukasi digital yang memengaruhi kelompok rentan dan kelompok aktif berjudi secara langsung. Meskipun memiliki struktur dan mekanisme intervensi yang berbeda, penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa pemodelan matematika dapat digunakan untuk menganalisis dinamika perilaku adiktif dan mengevaluasi strategi pengendaliannya.

Profil kontrol optimal ($u(t)$) menunjukkan intensitas intervensi tertinggi pada awal periode, sekitar 0.183, kemudian menurun secara bertahap. Dalam konteks kebijakan, pola ini dapat menjadi dasar perancangan kampanye edukasi digital melalui media sosial, video edukatif, informasi risiko finansial, dan penyebaran konten pencegahan kepada kelompok rentan. Pendekatan tersebut relevan dengan kampanye nasional #JudiPastiRugi yang diluncurkan Kementerian Komunikasi dan Digital pada 2025. Edukasi selanjutnya dapat dilakukan secara berkala melalui pendampingan individu yang ingin berhenti berjudi dan evaluasi perubahan perilaku. Hasil simulasi masih bergantung pada asumsi parameter dan belum memperhitungkan kemungkinan kekambuhan. Oleh karena itu, validasi menggunakan data empiris dan analisis sensitivitas diperlukan sebelum hasilnya digunakan sebagai dasar penentuan intensitas intervensi dan alokasi sumber daya kebijakan.

D. Kesimpulan

Model SGQ dengan kontrol edukasi digital memberikan kerangka matematis untuk menganalisis pengendalian penyebaran judi online di Indonesia. Penerapan kontrol optimal berupa edukasi digital pada model SGQ mampu menekan aktivitas judi online dalam simulasi. Kontrol menurunkan puncak proporsi individu aktif berjudi dari 0.2974 menjadi 0.1443 dan mengurangi akumulasi aktivitas berjudi sebesar 45.05%. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa efektivitas edukasi dan biaya intervensi memengaruhi hasil pengendalian. Namun,



validasi menggunakan data empiris tetap diperlukan agar model dapat mendukung perumusan kebijakan pencegahan judi online.

E. ACKNOWLEDGEMENT

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pemerintah Provinsi Sulawesi Barat atas dukungan pendanaan yang diberikan berdasarkan Keputusan Gubernur Sulawesi Barat Nomor 74 Tahun 2026.

DAFTAR PUSTAKA

- Asosiasi Penyelenggara Jasa Internet Indonesia (APJII). (2024). *APJII jumlah pengguna internet Indonesia tembus 221 juta orang*. Asosiasi Penyelenggara Jasa Internet Indonesia. <https://www.apjii.or.id/berita/d/apjii-jumlah-pengguna-internet-indonesia-tembus-221-juta-orang>
- Asosiasi Penyelenggara Jasa Internet Indonesia (APJII). (2025). Survei penetrasi internet dan perilaku penggunaan internet 2025. <https://survei.apjii.or.id/survei/2025>
- Badan Pusat Statistik. (2025). Statistik Indonesia 2025. Badan Pusat Statistik. <https://www.bps.go.id/id/publication/2025/02/28/8cfe1a589ad3693396d3db9f/statistik-indonesia-2025.html>
- Fleming, W. H., & Rishel, R. W. (1975). *Deterministic and Stochastic Optimal Control*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-6380-7>
- Kong, Y., Li, T., Wang, Y., Cheng, X., Wang, H., & Lei, Y. (2021). Dynamics Analysis of an Online Gambling Spreading Model on Scale-Free Networks. *Advances Difference Equations*, 2021(11), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s13662-020-03165-z>
- Pusat Pelaporan dan Analisis Transaksi Keuangan (PPATK). (2025). *Produk Integritas: PPATK Mengawal Asta Cita Indonesia*. https://www.ppatk.go.id/backend/assets/images/publikasi/1742371852_.pdf
- Pusat Pelaporan dan Analisis Transaksi Keuangan (PPATK). (2026). *Catatan Capaian Strategis PPATK Tahun 2025: Menjaga Kedaulatan dan Integritas Ekonomi Bangsa*. Pusat Pelaporan Dan Analisis Transaksi Keuangan. https://www.ppatk.go.id/siaran_pers/read/1594/catatan-capaian-strategis-ppatk-tahun-2025-menjaga-kedaulatan-dan-integritas-ekonomi-bangsa-jakarta-28-januari-2026-b001hm0531i2026-.html
- Resmawan, R., Eka, M., Nurwan, N., & Achmad, N. (2020). Analisis Kontrol Optimal Pada Model Matematika Penyebaran Pengguna Narkoba Dengan Faktor Edukasi. *Jurnal Ilmiah Matematika Dan Terapan*, 17, 238–248. <https://doi.org/https://doi.org/10.22487/2540766X.2020.v17.i2.15201>
- Side, S., Sanusi, W., & Rustan, N. K. (2020). Model Matematika SIR Sebagai Solusi Kecanduan Penggunaan Media Sosial. *Journal of Mathematics Computations and Statistics*, 3(2), 126–138. <http://www.ojs.unm.ac.id/jmathcos>
- Yasmine, D. I., Colombijn, F., Deursen, A. J. A. M. Van, & Ingen, E. Van. (2025). Internet Skills , Digital Engagement , and Outcomes Among Urban Youth in Jakarta , Indonesia : Incorporating a Global South Context in Measuring Digital Inequality South Context in Measuring Digital Inequality. *Information, Communication & Society*, 28(15), 2774–2794. <https://doi.org/10.1080/1369118X.2025.2479778>

