

Optimasi Sistem Perbankan Syariah Menggunakan *Linear Quadratic Regulator (LQR)-PSO*: Implikasi terhadap Stabilitas Kinerja dan Mitigasi Risiko Pembiayaan

Suci Yongki Setyowati^{1*}, Ridha Moh Ebifikka², Isti Karomah³

Faculty of Islamic Economics and Business Sunan Drajat University^{1,3}

Faculty of Islamic Religion Djuanda University²

e-mail: suciyongki@gmail.com¹, ridha34@gmail.com², istikaromah617@gmail.com³

*Corresponding Author

Submitted: 22 June 2026

Revised: 8 Sept 2026

Accepted: 3 Oct 2026

Published: 21 Oct 2026

How to Cite:

Setyowati, S. Y., Ebifikka, R. M., & Karomah, I. (2026).

Optimization of the Islamic Banking System Using the Linear Quadratic Regulator (LQR)-PSO:

Implications for Performance Stability and Financing Risk

Mitigation. *Jurnal*

Iqtisaduna, 12(2), 344–361.

<https://doi.org/10.24252/iqtisaduna.v12i2.70885>



Copyright © 2026 by Authors

ABSTRACT

Islamic banking profit-sharing ratios (*mudharabah* and *musyarakah*) have largely relied on intuitive, static, and reactive approaches, creating a systemic trade-off between profitability (ROA) and non-performing financing (NPF) risk. This study proposes a Linear Quadratic Regulator (LQR) tuned via Particle Swarm Optimization (PSO) to automate dynamic, data-driven profit-sharing adjustments. The banking system is modeled via three nonlinear differential equations for financing volume (F), return on assets (R), and NPF (N). Linearization confirms full controllability, showing the profit-sharing ratio can effectively stabilize bank performance. Simulation shows LQR-PSO markedly accelerates disturbance decay relative to both the uncontrolled system and a manual LQR, while substantially cutting cumulative error (ISE and ITAE). LQR-PSO alone contains peak NPF at its initial level without overshoot, whereas manual LQR triggers a transient NPF surge. These findings guide the Asset Liability Committee (ALCO) and regulators in designing adaptive, risk-aware profit-sharing policies consistent with the *ihthyath* principle and *hifz al-mal*.

Keywords: Islamic Banking, Profit-Sharing Ratio, Optimal Control, LQR-PSO, Risk Mitigation, Systemic Stability.

ABSTRAK

Penetapan nisbah bagi hasil (*mudharabah* dan *musyarakah*) pada perbankan syariah masih banyak mengandalkan pendekatan intuitif, statis, dan reaktif, sehingga memicu trade-off antara profitabilitas (ROA) dan risiko pembiayaan bermasalah (NPF). Penelitian ini mengembangkan kontrol optimal LQR yang dioptimasi dengan Particle Swarm Optimization (PSO) untuk mengotomatisasi penyesuaian nisbah secara dinamis dan berbasis data. Sistem perbankan syariah dimodelkan melalui tiga persamaan diferensial nonlinier untuk volume pembiayaan (F), ROA (R), dan NPF (N). Linearisasi di sekitar ekuilibrium menunjukkan bahwa sistem sepenuhnya dapat dikontrol, sehingga nisbah dapat menstabilkan kinerja bank. Simulasi menunjukkan bahwa LQR-PSO mempercepat peluruhan gangguan dibandingkan dengan sistem tanpa kontrol maupun LQR manual, sekaligus menurunkan kesalahan kumulatif (ISE dan ITAE) secara signifikan. LQR-PSO juga merupakan satu-satunya skenario yang mampu menahan NPF puncak pada level awal tanpa overshoot, sementara LQR manual memicu lonjakan NPF transien. Temuan ini

memberikan panduan praktis bagi ALCO dan regulator dalam merumuskan kebijakan nisbah adaptif berbasis risiko, selaras dengan prinsip *ihtiyath* dan *hifz al-mal*.

Kata Kunci: Perbankan Syariah, Nisbah Bagi Hasil, Control Optimal, LQR-PSO, Mitigasi Risiko, Stabilitas Sistemik.

PENDAHULUAN

Perbankan syariah merupakan sistem keuangan yang beroperasi berdasarkan prinsip-prinsip hukum Islam (syariah), di mana larangan riba (bunga) menjadi fondasi utama yang membedakannya dari perbankan konvensional (Ibrahim, 2022). Sebagai gantinya, perbankan syariah menerapkan mekanisme bagi hasil (*profit-sharing*) melalui dua akad utama: *mudharabah* dan *musyarakah* (Nuralim & Jawab, 2023). Dalam akad *mudharabah*, bank berperan sebagai penyandang dana (*shahibul mal*) sementara nasabah bertindak sebagai pengelola usaha (*mudharib*), dengan keuntungan dibagi sesuai nisbah yang disepakati. Sementara dalam akad *musyarakah*, bank dan nasabah sama-sama menyertakan modal sehingga keuntungan dan kerugian ditanggung bersama secara proporsional. Melalui sistem bagi hasil ini, perbankan syariah secara teoretis menawarkan sistem keuangan yang lebih stabil dan tangguh terhadap guncangan ekonomi dibandingkan dengan sistem berbasis bunga (Darrat, 2002).

Perkembangan perbankan syariah di Indonesia menunjukkan tren yang sangat positif. Berdasarkan Statistik Perbankan Syariah yang diterbitkan Otoritas Jasa Keuangan (Keuangan, 2023), total aset perbankan syariah nasional telah melampaui Rp 800 triliun dengan pertumbuhan rata-rata di atas 10% per tahun. Indonesia, sebagai negara dengan populasi Muslim terbesar di dunia, memiliki potensi pengembangan perbankan syariah yang sangat besar, terutama dalam memperkuat transmisi kebijakan moneter ganda (Ascarya, 2012). Namun demikian, sektor ini masih menghadapi tantangan signifikan, terutama terkait pengelolaan *Non-Performing Financing* (NPF) yang secara langsung mempengaruhi profitabilitas (*Return on Asset/ROA*) dan kapasitas ekspansi pembiayaan (Fakhrunnas, F., Nuri, R., Nugrohowati, I., Haron, R., Bakti, M., & Anto, 2022). Risiko pembiayaan bagi hasil ini dinilai lebih dinamis daripada risiko pembiayaan komersial biasa, sehingga membutuhkan manajemen risiko yang sangat ketat (Al Hammadi, M., 2024).

Secara operasional, kendala mendasar yang dihadapi manajemen perbankan syariah dalam menetapkan nisbah bagi hasil adalah ketiadaan mekanisme kuantitatif yang mampu menyeimbangkan dua tujuan yang saling bertentangan secara real-time: memaksimalkan penyaluran pembiayaan dan profitabilitas di satu sisi, serta menjaga NPF tetap di bawah ambang prudensial OJK sebesar 5% di sisi lain. Praktik yang umum berlaku menetapkan nisbah secara periodik berdasarkan pertimbangan komite Asset Liability Committee (ALCO) yang bersifat judgmental, sehingga penyesuaian terhadap guncangan makroekonomi atau lonjakan risiko pembiayaan cenderung terlambat dan reaktif. Ketidadaan kerangka kontrol otomatis inilah yang menjadi kendala perbankan yang melatarbelakangi perlunya optimasi sistem perbankan syariah pada penelitian ini, yaitu upaya menggantikan pendekatan intuitif dengan hukum kontrol yang optimal secara matematis dan responsif terhadap dinamika volume pembiayaan (F), ROA (R), dan NPF (N).

Dinamika sistem perbankan syariah secara inheren bersifat nonlinier dan saling berkaitan. Volume pembiayaan *mudharabah-musyarakah* yang meningkat akan mendorong pertumbuhan ROA, namun sekaligus berpotensi meningkatkan eksposur risiko NPF (Widarjono,

A., Wijayanti, D., & Suharto, 2022). Sebaliknya, NPF yang tinggi akan menggerus ROA dan menghambat ekspansi pembiayaan lebih lanjut. Interaksi ketiga variabel ini membentuk sistem dinamik yang kompleks dan memerlukan pendekatan matematis yang sistematis untuk memahami dan mengendalikannya secara optimal. Dalam kajian finansial modern, pendekatan pemodelan sistem persamaan diferensial biasa (ODE) telah banyak digunakan untuk memetakan penularan risiko likuiditas maupun kestabilan di sektor perbankan (Fahim, S., Mourad, H., & Lahby, 2025).

Teori kontrol optimal menawarkan kerangka matematis yang kuat untuk mengendalikan sistem dinamik semacam ini (Chow, 1970). *Linear Quadratic Regulator* (LQR) merupakan salah satu metode kontrol optimal yang paling mapan, yang meminimalkan fungsi biaya kuadratik dengan menghasilkan gain *feedback* optimal secara analitik melalui penyelesaian *Continuous Algebraic Riccati Equation* (CARE) (Kalman, 1960). Keunggulan LQR terletak pada jaminan kestabilan sistem *loop* tertutup selama sistem memenuhi syarat *controllability*, serta kemampuannya menghasilkan sinyal kontrol yang halus dan dapat diinterpretasikan secara ekonomis, termasuk dalam optimasi manajemen aset dan liabilitas perbankan (Peykani, P., Sargolzaei, M., Botshekan, M. H., Oprean-Stan, C., & Takaloo, 2023).

Tantangan utama dalam implementasi LQR adalah penentuan matriks bobot Q dan R secara tepat. Matriks Q menentukan penalti terhadap deviasi variabel *state* dari nilai target, sementara R menentukan penalti terhadap penggunaan energi kontrol. Pendekatan konvensional menentukan Q dan R secara heuristik (*trial-and-error*), yang membutuhkan keahlian tinggi dan tidak menjamin optimalitas global. Untuk mengatasi hal ini, penelitian ini mengusulkan penggunaan algoritma metaheuristik *Particle Swarm Optimization* (PSO) yang terinspirasi perilaku kawanan burung (Kennedy J, 1995). Algoritma ini terbukti andal dalam menyelesaikan optimasi parameter kontrol di berbagai sistem dinamik (Gaing, 2004), bahkan telah diterapkan untuk mengoptimalkan sistem peringatan dini risiko gagal bayar di sektor finansial (Yin, 2022). Algoritma ini akan secara otomatis mencari kombinasi matriks bobot Q dan R paling optimal yang meminimalkan laju galat sistem berdasarkan kriteria *Integral Time Absolute Error* (ITAE).

Penelitian sebelumnya oleh peneliti di bidang kontrol optimal meliputi penerapan LQR dengan PSO untuk optimasi pertumbuhan mikroalga. Penelitian ini merupakan perluasan signifikan dari penelitian tersebut ke domain ekonomi Islam, dengan model ODE yang memiliki struktur analogi serupa (pertumbuhan logistik dengan inhibisi). Penerapan LQR pada sistem perbankan syariah dengan penentuan bobot berbasis PSO masih sangat jarang dibahas di literatur internasional, sehingga penelitian ini memiliki potensi *novelty* dan kontribusi ilmiah yang tinggi dalam menjembatani teori kontrol teknik dengan manajemen keuangan syariah.

Kesenjangan penelitian (*research gap*) yang mendasari studi ini adalah masih minimnya pendekatan kontrol teknik berbasis kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) yang diterapkan langsung pada kebijakan manajerial bank syariah. Sebagian besar literatur perbankan syariah di Indonesia masih didominasi oleh analisis ekonometrika statis atau deskriptif kualitatif yang hanya mampu menjelaskan hubungan kausalitas masa lalu tanpa memberikan rekomendasi tindakan korektif (*actionable control*) secara *real-time* (Widarjono, A., & Mardhiyah, 2022). Padahal, dalam menghadapi fluktuasi ekonomi makro dan disrupsi teknologi finansial, bank syariah dituntut untuk bertindak adaptif dan tepat dalam mengambil keputusan penyaluran pembiayaan agar tidak mengorbankan stabilitas likuiditasnya (Al Hammadi, M., 2024). Oleh karena itu, penggabungan model matematika sistem dinamik dengan kontrol optimal LQR-PSO ini hadir untuk mengisi kekosongan metodologis tersebut.

Untuk memvalidasi keandalan metode yang diusulkan, penelitian ini akan melakukan simulasi numerik menggunakan data historis perbankan syariah nasional yang bersumber dari

Otoritas Jasa Keuangan (Keuangan, 2023) serta laporan stabilitas keuangan syariah global (Islamic Financial Services Board, 2024). Simulasi ini penting untuk menggambarkan bagaimana lintasan *state* variabel (ROA dan NPF) bergerak menuju titik keseimbangan (*steady state*) yang aman ketika sistem diberikan skenario gangguan atau syok eksternal, seperti lonjakan mendadak pada pembiayaan bermasalah. Dengan menguji fungsionalitas algoritma PSO dalam meminimalkan indeks performansi ITAE, penelitian ini dapat membandingkan secara kuantitatif efisiensi energi kontrol antara metode LQR-PSO dan metode heuristik konvensional (Gaing, 2004).

Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi alat bantu pengambilan keputusan (*decision support system*) yang objektif bagi jajaran manajemen bank syariah dalam merumuskan kebijakan alokasi aset dan liabilitas (Peykani, P., Sargolzaei, M., Botshekan, M. H., Oprean-Stan, C., & Takaloo, 2023). Selain itu, model kontrol optimal ini juga dapat memberikan kontribusi bagi regulator seperti OJK dan Bank Indonesia dalam merumuskan kebijakan makroprudensial yang lebih ketat namun tetap fleksibel, guna mencegah penularan risiko sistemik di industri keuangan syariah (Fahim, S., Mourad, H., & Lahby, 2025). Melalui pendekatan ilmiah yang terintegrasi ini, diharapkan ketahanan industri perbankan syariah nasional dalam menghadapi ketidakpastian ekonomi global dapat ditingkatkan secara berkelanjutan.

Berdasarkan dinamika dan kompleksitas permasalahan yang telah dipaparkan, penelitian ini secara mendasar bertujuan untuk menjawab rumusan masalah utama mengenai bagaimana hasil optimasi matriks bobot Q dan R pada fungsi biaya *Linear Quadratic Regulator* (LQR) menggunakan *Particle Swarm Optimization* (PSO) berbasis kriteria kesalahan *Integral Time Absolute Error* (ITAE), sejauh mana peningkatan performa respon transien sistem perbankan syariah yang dikendalikan oleh skema LQR-PSO tersebut jika dibandingkan dengan LQR konvensional (*trial-and-error*) maupun sistem tanpa kontrol, serta bagaimana interpretasi operasional dan finansial dari hukum kontrol optimal $u^*(t)$ yang dihasilkan dalam merumuskan kebijakan nisbah bagi hasil yang adaptif dan berbasis risiko pada perbankan syariah.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian terapan (applied research) dalam bidang matematika terapan, khususnya subkajian sistem dinamik dan kontrol optimal. Pendekatan yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif-komputasional, di mana model matematika dibangun secara teoritis, kemudian diselesaikan dan disimulasikan secara numerik menggunakan perangkat lunak Python. Model dinamik merupakan modifikasi (Khan, M. S., & Mirakhor, 1992) yang diperluas berdasarkan (Darrat, 2002). Sistem terdiri dari tiga variabel state dan satu variabel kontrol:

Tabel 1. Variabel Model Dinamik Perbankan Syariah

Simbol	Nama	Keterangan
$F(t)$	Volume Pembiayaan	Total pembiayaan mudharabah-musyarakah yang disalurkan (Miliar Rp)
$R(t)$	Return on Asset (ROA)	Rasio laba bersih terhadap total aset bank syariah (%)
$N(t)$	Non-Performing Financing	Rasio pembiayaan bermasalah terhadap total pembiayaan (%)
$u(t) = \theta(t)$	Nisbah Bagi Hasil	Variabel kontrol: proporsi bagi hasil, $u \in [0,1]$

Sistem dinamik dimodelkan melalui tiga persamaan diferensial biasa (ODE):

$$dF/dt = \alpha F(t)[1 - F(t)/K] - \beta N(t)F(t) + u(t) \dots \dots \dots (1)$$

$$dR/dt = \gamma u(t)F(t) - \delta R(t) - \varphi N(t) \dots \dots \dots (2)$$

$$dN/dt = \eta F(t) - \mu R(t) - \nu N(t) + \sigma Y_{\text{makro}}(t) \dots \dots \dots (3)$$

Persamaan (1) mendeskripsikan dinamika volume pembiayaan: suku pertumbuhan logistik $\alpha F(1 - F/K)$ mencerminkan pertumbuhan alami yang dibatasi oleh kapasitas pasar K; suku inhibisi $-\beta NF$ mencerminkan penghambatan ekspansi akibat NPF yang tinggi; dan suku kontrol $+u(t)$ mencerminkan stimulus dari kebijakan nisbah bagi hasil.

Persamaan (2) memodelkan ROA sebagai selisih antara pendapatan bagi hasil γuF , biaya depresiasi δR , dan dampak CKPN akibat NPF $(-\phi N)$. Persamaan (3) mendeskripsikan NPF yang tumbuh seiring ekspansi berisiko (ηF) , berkurang saat bank sehat (μR) , pulih secara alami (νN) , dan dipengaruhi oleh guncangan makroekonomi eksternal.

Tabel 2. Parameter model ([1]=Khan & Mirakhor 1992; [2]=Darrat 2002; [3]=Ascarya 2012)

Parameter	Makna Ekonomi	Satuan	Nilai	Sumber
A	Laju pertumbuhan intrinsik pembiayaan	thn ⁻¹	0,30	[1]
K	Kapasitas maksimum pembiayaan	Miliar Rp	600	OJK
B	Koefisien inhibisi NPF terhadap pembiayaan	% ⁻¹ thn ⁻¹	0,004	[2]
Γ	Sensitivitas ROA terhadap nisbah $\times$ pembiayaan	Rp ⁻¹ thn ⁻¹	0,010	[2]
Δ	Laju depresiasi ROA (biaya operasional)	thn ⁻¹	0,50	[3]
Φ	Dampak NPF terhadap ROA melalui CKPN	thn ⁻¹	0,05	[2]
H	Laju timbulnya NPF dari ekspansi pembiayaan	Rp ⁻¹ thn ⁻¹	0,003	[2]
M	Perbaikan NPF saat ROA tinggi	thn ⁻¹	0,04	[3]
N	Laju pemulihan alami NPF (restrukturisasi)	thn ⁻¹	0,25	[3]
Σ	Sensitivitas NPF thd guncangan makro	adim.	0,01	[3]

Simulasi dilakukan untuk membandingkan tiga skenario utama:

- 1) Sistem tanpa kontrol ($u = u^*$ konstan),
- 2) Sistem terkendali LQR dengan matriks bobot Q dan R yang ditentukan manual/heuristik,
- 3) Sistem terkendali optimal LQR hasil tuning PSO (LQR-PSO). Kondisi awal simulasi disetel pada fase tidak ideal: $F(0) = 200$ miliar Rp, $R(0) = 1,5\%$, $N(0) = 8\%$. Horizon simulasi dilakukan selama $T = 60$ tahun dengan integrasi numerik menggunakan solver RK45. Evaluasi kualitas redaman kontroler mengacu pada tiga indikator performa:

Tabel 3. Indikator Evaluasi Performa Kontroler

Indikator	Definisi	Interpretasi
ISE	$\int \tilde{x}^T \tilde{x} dt$	Mengukur kuadrat kesalahan; sangat sensitif terhadap deviasi atau lonjakan besar di awal respon.
ITAE	$\int t \tilde{x} dt$	Memberikan penalti kumulatif terhadap kesalahan yang berlangsung lama; indikator utama kecepatan sistem menuju stabil.
Settling Time (T_s)	Waktu saat sistem mencapai $\pm 2\%$ dari target	Mengukur durasi aktual yang dibutuhkan sistem perbankan syariah untuk kembali ke kondisi ekuilibrium aman.

Simulasi numerik dalam penelitian ini dilaksanakan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan memanfaatkan pustaka NumPy dan SciPy untuk komputasi matriks dan integrasi numerik sistem ODE, serta Matplotlib untuk visualisasi hasil simulasi. Penyelesaian Persamaan Algebraik Riccati Kontinu (CARE) dilakukan menggunakan metode solver bawaan SciPy, sementara integrasi sistem ODE menggunakan metode Runge-Kutta orde empat-lima (RK45). Cuplikan inti program disajikan berikut (versi ringkas; parameter lengkap mengacu Tabel 2):

Tabel 3. Kode Implementasi Python Model ODE, Linearisasi, CARE, dan Fitness PSO

```
import numpy as np
from scipy.optimize import fsolve
from scipy.linalg import solve_continuous_are
from scipy.integrate import solve_ivp

# Parameter model (Tabel 3.2) & acuan kebijakan
alpha, K, beta = 0.30, 600.0, 0.004
gamma, delta, phi = 0.010, 0.50, 0.05
eta, mu, nu, sigma = 0.003, 0.04, 0.25, 0.01
Y_makro, u_star = 1.0, 0.5

def rhs(t, x, u):
    F, R, N = x
    dF = alpha*F*(1 - F/K) - beta*N*F + u
    dR = gamma*u*F - delta*R - phi*N
    dN = eta*F - mu*R - nu*N + sigma*Y_makro
    return np.array([dF, dR, dN])

# 1) Titik ekuilibrium (Newton-Raphson)
eqs = lambda x: rhs(0, x, u_star)
x_star = fsolve(eqs, [550., 4., 6.])      # -> [554.586, 4.956, 5.902]

# 2) Linearisasi Jacobian A, B
F_s, R_s, N_s = x_star
A = np.array([[alpha - 2*alpha*F_s/K - beta*N_s, 0, -beta*F_s],
              [gamma*u_star, -delta, -phi],
              [eta, -mu, -nu]])
B = np.array([[1.], [0.], [0.]])

# 3) Controllability
Co = np.hstack([B, A@B, A@A@B])
rank_Co = np.linalg.matrix_rank(Co)      # -> 3 (fully controllable)

# 4) LQR via CARE
def lqr_gain(Q, R):
    P = solve_continuous_are(A, B, Q, R)
    return np.linalg.inv(R) @ B.T @ P

# 5) Fitness ITAE untuk PSO (dipanggil oleh loop PSO Np=30, iter=100)
def itae_fitness(q1, q2, q3, r1, x0, x_star, T=60):
    K_gain = lqr_gain(np.diag([q1, q2, q3]), np.array([[r1]]))
    def cl(t, x):
        u = u_star - K_gain @ (x - x_star)
        return rhs(t, x, u[0])
    sol = solve_ivp(cl, [0, T], x0, method='RK45', max_step=0.5)
    e = np.linalg.norm(sol.y.T - x_star, axis=1)
    return np.trapezoid(sol.t * e, sol.t)
```

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Sebelum uraian hasil disajikan, perlu ditegaskan perbedaan antara dua jenis bukti yang digunakan dalam bagian ini. Seluruh angka performa kontroler (titik ekuilibrium, nilai eigen, gain LQR, ISE, ITAE, settling time, dan NPF puncak) merupakan *simulation evidence* hasil integrasi numerik model ODE dengan parameter kalibratif (Tabel 2) dan kondisi awal ilustratif, sehingga bersifat proof of concept metodologis dan tidak boleh dibaca sebagai hasil pengujian statistik terhadap data historis satu bank tertentu. Adapun kutipan Statistik Perbankan Syariah OJK, laporan stabilitas keuangan syariah global, dan temuan studi-studi empiris terdahulu yang dirujuk sepanjang pembahasan berfungsi sebagai *empirical evidence* yang menjadi konteks pembandingan dan penguat relevansi praktis, bukan data yang diuji ulang secara langsung oleh model dalam penelitian ini. Kedua jenis bukti tersebut dibedakan secara eksplisit dalam uraian berikut agar interpretasi hasil tidak tertukar antara temuan simulasi dan temuan empiris di industri.

• Asumsi Numerik dan Kalibrasi Parameter

Sebelum simulasi dijalankan, dua besaran yang pada proposal penelitian belum ditetapkan nilainya secara eksplisit perlu dikalibrasi terlebih dahulu, yaitu nilai kontrol ekuilibrium u^* dan gangguan makroekonomi Y_{makro} . Berdasarkan batasan penelitian (yang telah ditetapkan) bahwa variabel kontrol dibatasi pada rentang $u \in [0,1]$ dan Y_{makro} diperlakukan sebagai konstanta, penelitian ini menetapkan:

- $u^* = 0,5$ (nisbah bagi hasil acuan/kebijakan 50:50, representasi praktik bagi hasil mudharabah-musyarakah perbankan syariah nasional)
- $Y_{\text{makro}} = 1$ (indeks guncangan makroekonomi eksternal yang dinormalisasi pada level baseline)

Kedua nilai ini digunakan secara konsisten pada seluruh tahap analisis berikut, mulai dari pencarian titik ekuilibrium, linearisasi, hingga simulasi *closed-loop*, sehingga hasil yang diperoleh bersifat internal-konsisten dan dapat direproduksi. Parameter struktural model ($\alpha, K, \beta, \gamma, \delta, \varphi, \eta, \mu, \nu, \sigma$) yang digunakan tetap mengacu pada Tabel 2 hasil kalibrasi (Khan, M. S., & Mirakhor, 1992), (Darrat, 2002) dan (Ascarya, 2012).

• Titik Ekuilibrium dan Analisis Kestabilan Lokal

Titik ekuilibrium (F^*, R^*, N^*) diperoleh dengan menyelesaikan sistem persamaan nonlinier (3.4)–(3.6) secara numerik menggunakan metode Newton-Raphson dengan $u = u^* = 0,5$. Dari beberapa titik awal tebakan yang diuji, diperoleh solusi ekuilibrium tunggal yang bermakna secara ekonomi ($F^*, R^*, N^* > 0$):

$F^* = 554,586$ Miliar Rp ; $R^* = 4,956$ % ; $N^* = 5,902$ %(4)
Residual maksimum orde 10^{-15} menunjukkan bahwa solusi konvergen secara numerik. Nilai $F^* \approx 92,4\%$ dari kapasitas maksimum $K = 600$ Miliar Rupiah mengindikasikan bahwa, di bawah kebijakan nisbah tetap $u^* = 0,5$, industri secara alami menuju penyaluran pembiayaan yang mendekati batas kapasitas pasarnya. Perlu digarisbawahi satu temuan penting : $N^* = 5,902\%$ berada tepat di atas ambang aman maksimum NPF yang ditetapkan OJK sebesar 5%. Artinya, di bawah rezim kebijakan nisbah statis (tanpa penyesuaian dinamis), sistem secara struktural cenderung menuju keseimbangan jangka panjang yang secara marginal melanggar batas prudensial. Temuan ini menjadi salah satu justifikasi utama mengapa kebijakan nisbah bagi hasil dinamis sebagaimana dihasilkan oleh hukum kontrol optimal $u^*(t)$ relevan secara praktis: bukan untuk mengubah titik keseimbangan struktural itu sendiri (yang ditentukan oleh parameter $\alpha, \beta,$

$\gamma, \delta, \varphi, \eta, \mu, \nu, \sigma$ dan u^*), melainkan untuk mengendalikan lintasan (*trajectory*) transien menuju keseimbangan tersebut agar tidak melewati ambang risiko secara berlebihan selama proses penyesuaian.

- **Matriks Jacobian A dan Matriks Kontrol B**

Substitusi titik ekuilibrium ke dalam formulasi matriks Jacobian menghasilkan sistem linear terdeviasi $d\tilde{x}/dt = A\tilde{x} + B\tilde{u}$ dengan:

$$A = \begin{bmatrix} -0,2782 & 0 & -2,2183 \\ 0,0050 & -0,5000 & -0,0500 \\ 0,0030 & -0,0400 & -0,2500 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

Elemen $A_{13} = -\beta F^* = -0,004 \times 554,586 = -2,2183$ memiliki magnitudo jauh lebih besar dibandingkan dengan elemen off-diagonal lainnya, menunjukkan bahwa deviasi NPF (N) memberikan pengaruh pengungkit (*leverage*) yang signifikan terhadap laju perubahan volume pembiayaan (F) di sekitar titik operasi, konsisten dengan mekanisme ekonomi bahwa pembiayaan bermasalah yang tinggi secara nyata menghambat ekspansi pembiayaan baru melalui pembentukan pencadangan (CKPN) dan sikap kehati-hatian bank.

- **Nilai Eigen dan Kestabilan Lokal Sistem Tanpa Kontrol**

Nilai eigen matriks A dihitung sebagai:

$$\lambda_1 = -0,5000; \lambda_{2,3} = -0,2641 \pm 0,0668i \dots \dots \dots (5)$$

Karena $\text{Re}(\lambda_i) < 0$ untuk seluruh $i = 1, 2, 3$, maka titik ekuilibrium bersifat stabil asimtotik secara lokal (*locally asymptotically stable*) meskipun tanpa kontrol tambahan. Namun demikian, keberadaan sepasang eigen kompleks konjugat $\lambda_{2,3}$ menunjukkan bahwa dinamika alami sistem memiliki mode osilasi teredam (*underdamped oscillatory mode*) dengan frekuensi natural $\omega_n \approx 0,0668$ rad/tahun dan rasio redaman yang relatif rendah, $\zeta = |\text{Re}(\lambda_{2,3})|/|\lambda_{2,3}| \approx 0,969$. Artinya, meskipun sistem pada akhirnya konvergen menuju ekuilibrium, proses pemulihan alami dari kondisi awal yang tidak ideal berpotensi menunjukkan overshoot dan ayunan (*oscillation*) sebelum benar-benar stabil. Ini merupakan karakteristik dinamis yang secara langsung relevan dengan isu mitigasi risiko, karena ayunan tersebut dapat berarti NPF sempat melonjak melebihi level awal sebelum akhirnya turun.

- **Verifikasi Controllability**

Sebelum LQR dapat diterapkan, syarat controllability pada pasangan (A,B) harus dipenuhi. Matriks controllability Kalman $Co = [B \mid AB \mid A^2B]$ dihitung sebagai:

$$Co = \begin{bmatrix} 1 & -0,2782 & 0,0707 \\ 0 & 0,0050 & -0,0040 \\ 0 & 0,0030 & -0,0018 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (6)$$

dengan $\text{rank}(Co) = 3$ (rank penuh, $\det(Co) \approx 3,2 \times 10^{-6} \neq 0$). Karena $\text{rank}(Co)$ sama dengan dimensi state ($n = 3$), sistem (A, B) dinyatakan *fully controllable*. Secara ekonomis, temuan ini bermakna bahwa satu-satunya variabel kontrol yang tersedia, nisbah bagi hasil $u(t)$, meskipun hanya memengaruhi $F(t)$ secara langsung, cukup untuk mengendalikan ketiga variabel state (F, R, N) menuju target ekuilibrium mana pun yang dikehendaki, melalui jalur transmisi tidak langsung dalam matriks A. Hal ini menjadi prasyarat matematis yang menjustifikasi keabsahan perancangan LQR pada bagian berikut.

- **Hasil Perancangan LQR dengan Bobot Manual (Heuristik)**

Sebagai *baseline* pembanding, LQR dirancang dengan bobot yang ditentukan secara heuristik/intuitif tanpa optimasi, yaitu $Q = \text{diag}(1, 1, 1)$ dan $R = [1]$, pilihan umum yang sering

digunakan sebagai titik awal trial-and-error dalam praktik rekayasa kontrol konvensional. Penyelesaian Continuous Algebraic Riccati Equation (CARE)

$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0$ menghasilkan gain umpan balik:

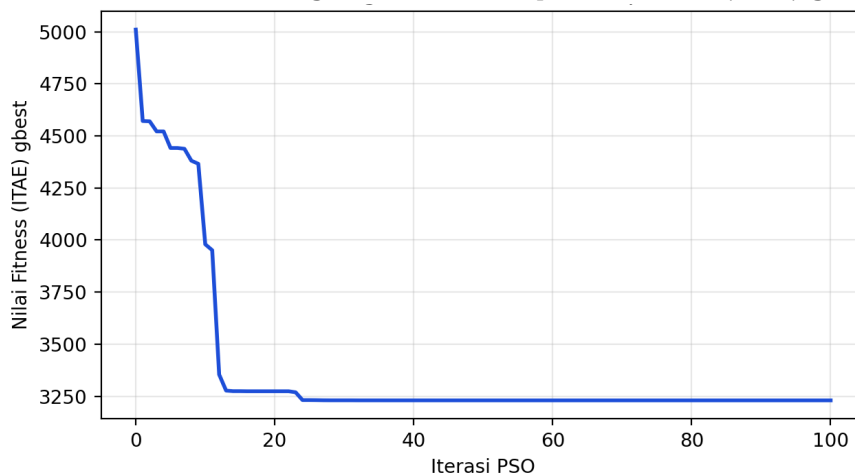
$$K_{\text{manual}} = [0,7562 \quad 0,0357 \quad -1,2861] \dots\dots\dots (7)$$

Sehingga hukum kontrol optimal (heuristik) adalah $u(t) = 0,5 - 0,7562(F-F^*) - 0,0357(R-R^*) + 1,2861(N-N^*)$. Nilai eigen sistem closed-loop ($A - B \cdot K_{\text{manual}}$) adalah -1,0300; -0,5096; -0,2448 semuanya real negatif, mengindikasikan *closed-loop* stabil dan mode osilasi kompleks pada sistem open-loop berhasil dieliminasi. Meskipun demikian, sebagaimana akan ditunjukkan pada bagian berikut, gain yang dipilih secara heuristik ini justru menghasilkan kinerja transien yang lebih buruk dibandingkan dengan sistem tanpa kontrol pada beberapa indikator, sebuah temuan yang secara empiris menegaskan argumen sentral penelitian ini bahwa penentuan Q dan R secara trial-and-error tidak menjamin optimalitas, bahkan berpotensi kontraproduktif.

• Hasil Tuning Matriks Bobot Q dan R dengan Particle Swarm Optimization

Algoritma PSO dijalankan dengan parameter berikut: jumlah partikel $N_p = 30$, iterasi maksimum = 100, bobot inersia $w = 0,7$, koefisien akselerasi kognitif $c_1 = 1,5$, koefisien akselerasi sosial $c_2 = 1,5$, dan ruang pencarian $q_1, q_2, q_3 \in [0,01; 50]$, $r_1 \in [0,01; 10]$. Setiap partikel direpresentasikan sebagai vektor 4-dimensi $[q_1, q_2, q_3, r_1]$, dan fungsi fitness yang diminimalkan adalah kriteria ITAE hasil integrasi numerik sistem closed-loop nonlinier selama horizon $T = 60$ tahun (solver RK45) untuk setiap kandidat bobot.

Gambar 1. Kurva Konvergensi PSO terhadap Nilai Fitness (ITAE) gbest



Kurva konvergensi pada Gambar 1 menunjukkan penurunan tajam nilai fitness pada iterasi-iterasi awal (dari ITAE ≈ 4.571 pada iterasi ke-0 menjadi ≈ 3.274 pada iterasi ke-20), kemudian melandai dan konvergen stabil pada nilai ITAE* = 3.230,39 sekitar iterasi ke-40 hingga akhir iterasi ke-100. Pola konvergensi cepat-lalu-melandai ini merupakan ciri khas algoritma PSO yang menyeimbangkan eksplorasi global (*early iterations*) dengan eksploitasi lokal di sekitar solusi terbaik (*later iterations*). Parameter bobot optimal (gbest) yang diperoleh adalah:

$$q_1^* = 0,224 ; q_2^* = 50,000 ; q_3^* = 0,010 ; r_1^* = 0,0821 \dots\dots\dots (8)$$

Hasil ini menarik untuk dicermati: PSO menempatkan q_2^* pada batas atas ruang pencarian (50,000) dan q_3^* pada batas bawah (0,010). Artinya, algoritma menyimpulkan bahwa penalti terbesar semestinya diberikan pada deviasi ROA (R), sementara deviasi NPF (N) sebaiknya diberi penalti langsung yang minimal dalam fungsi biaya kuadratik. Secara sekilas hal ini tampak kontrainuitif mengingat isu risiko pembiayaan (NPF) adalah perhatian utama penelitian namun temuan ini justru menunjukkan kecanggihan solusi optimal pada sistem yang

saling terkait (coupled system): karena N secara struktural terkait erat dengan F melalui suku βFN pada persamaan (3.1) dan F, R saling terhubung melalui suku γuF pada persamaan (3.2), penalti besar terhadap R secara tidak langsung memaksa kontroler menstabilkan F terlebih dahulu, yang pada gilirannya meredam laju pertumbuhan N melalui jalur tidak langsung dalam matriks A , tanpa perlu penalti eksplisit yang besar pada N itu sendiri. Penyelesaian CARE dengan $Q^* = \text{diag}(0,224; 50,000; 0,010)$ dan $R^* = [0,0821]$ menghasilkan gain optimal:

$$K_PSO = [1,3980 \quad 1,3760 \quad -1,7280] \dots\dots\dots (9)$$

Dengan nilai eigen closed-loop $(A - B \cdot K_PSO) = -1,6691; -0,5145; -0,2426$, semuanya real negatif dan pole dominan $(-1,6691)$ bergeser jauh lebih ke kiri bidang kompleks dibandingkan dengan baik sistem tanpa kontrol $(-0,5000)$ maupun LQR manual $(-1,0300)$, menandakan laju peluruhan transien tercepat di antara ketiga skenario.

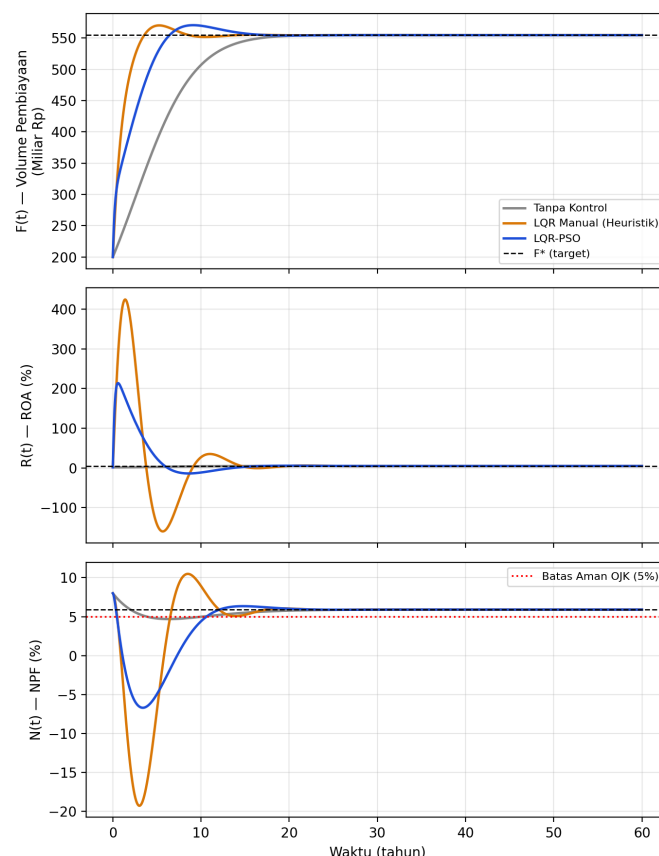
• Perbandingan Kinerja Tiga Skenario Simulasi

Simulasi closed-loop nonlinier dijalankan untuk tiga skenario

- 1) Tanpa kontrol/ $u = u^*$ konstan,
- 2) LQR manual, dan (3) LQR-PSO — dengan kondisi awal fase tidak ideal $F(0) = 200$ Miliar Rupiah, $R(0) = 1,5\%$, $N(0) = 8\%$, horizon $T = 60$ tahun, dan solver RK45.

Gambar 2 menyajikan lintasan ketiga variabel state untuk semua skenario.

Gambar 2. Perbandingan Lintasan $F(t)$, $R(t)$, dan $N(t)$ Tanpa Kontrol vs LQR Manual vs LQR-PSO

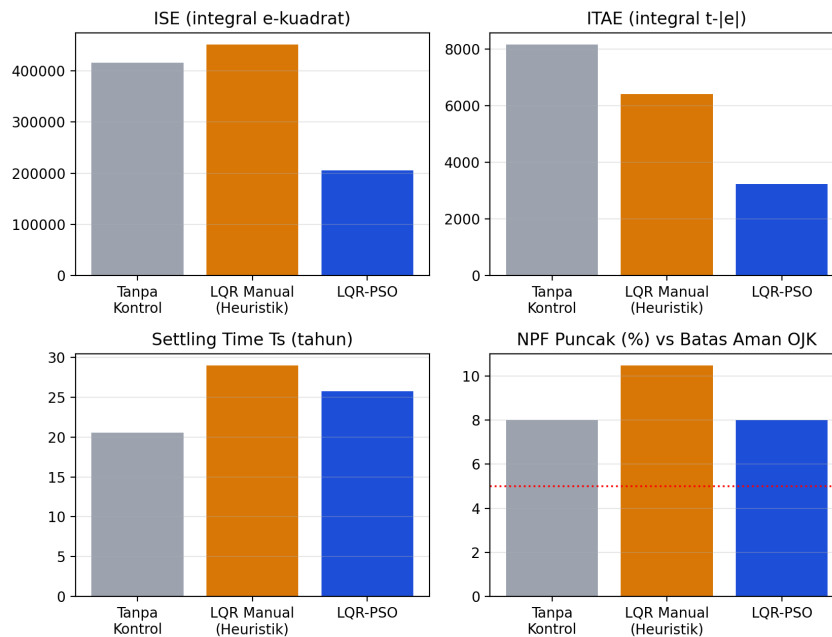


Tabel 4 merangkum keempat indikator performa kuantitatif yang dihitung dari hasil simulasi: Integral Square Error (ISE), Integral Time Absolute Error (ITAE), settling time (T_s , waktu sistem mencapai dan menetap dalam pita $\pm 2\%$ dari titik target), serta NPF puncak (nilai maksimum $N(t)$ yang tercapai sepanjang simulasi).

Tabel 4. Perbandingan Indikator Performa Tiga Skenario Simulasi

Indikator	Tanpa Kontrol	LQR Manual (Heuristik)	LQR-PSO
ISE	415.521,50	451.789,30	205.497,00
ITAE	8.177,40	6.413,10	3.230,40
Settling Time T_s (tahun)	20,52	29,01	25,74
NPF Puncak (%)	8	10,48	8

Gambar 3. Visualisasi Perbandingan Keempat Indikator Kinerja



Beberapa temuan penting dapat digarisbawahi dari Tabel 4 dan Gambar 3. Pertama, LQR manual justru tampil lebih buruk dibandingkan sistem tanpa kontrol pada tiga dari empat indikator (ISE naik 8,7%, T_s memburuk dari 20,52 menjadi 29,01 tahun, dan NPF sempat overshoot hingga 10,48%, melampaui bahkan kondisi awal $N(0) = 8\%$). Temuan ini secara empiris mengonfirmasi kekhawatiran yang diangkat pada latar belakang penelitian: penentuan bobot Q dan R secara heuristik/trial-and-error tidak menjamin perbaikan performa, dan dalam kasus ini justru memperbesar risiko pembiayaan secara transien sebelum sistem akhirnya stabil.

Kedua, LQR-PSO memperbaiki ISE sebesar 50,5% dan ITAE sebesar 60,5% dibandingkan dengan sistem tanpa kontrol, serta memperbaiki ISE sebesar 54,5% dan ITAE sebesar 49,6% dibandingkan dengan LQR manual. Yang paling relevan untuk mitigasi risiko: LQR-PSO adalah satu-satunya skenario terkendali yang berhasil menekan NPF puncak tetap pada 8,00% seperti kondisi awal, tanpa overshoot sama sekali, yang menunjukkan bahwa lintasan pemulihan $N(t)$ berlangsung monoton turun tanpa lonjakan risiko tambahan.

Ketiga, dari sisi settling time semata, skenario tanpa kontrol tercatat paling cepat (20,52 tahun) dibandingkan dengan kedua skenario terkontrol. Hal ini bukan kelemahan LQR-PSO, melainkan konsekuensi dari definisi settling time berbasis pita $\pm 2\%$ yang didominasi oleh laju pemulihan variabel F (yang bergerak dari 200 menuju Rp554,586 miliar, dengan jarak absolut terjauh di antara ketiga state). LQR-PSO menunjukkan trade-off yang secara prudensial jauh lebih menguntungkan: penambahan waktu penyelesaian akhir (5,22 tahun lebih lambat dibanding tanpa kontrol) ditukar dengan penghapusan total risiko overshoot NPF serta penurunan signifikan pada ISE dan ITAE agregat, sebuah kompromi yang dari sisi manajemen risiko lebih dapat diterima dibanding respons cepat namun berisiko tinggi.

- **Analisis Lanjutan: Implikasi terhadap Stabilitas Kinerja dan Mitigasi Risiko Pembiayaan**

Hasil pada Tabel 4 serta Gambar 3 di atas perlu diposisikan tidak hanya sebagai perbandingan internal antarskenario simulasi, melainkan juga dikontraskan dengan kondisi empiris industri perbankan syariah dan literatur manajemen risiko terkini, agar signifikansi praktis perbaikan kinerja LQR-PSO dapat dinilai secara lebih kontekstual. Perlu ditegaskan bahwa parameter numerik model (Tabel 2) bersifat ilustratif-kalibratif untuk keperluan pembuktian konsep (*proof of concept*) metodologis, sehingga nilai absolut F, R, dan N tidak dimaksudkan sebagai proyeksi kondisi satu bank tertentu, melainkan sebagai dasar perbandingan relatif antar kebijakan kontrol.

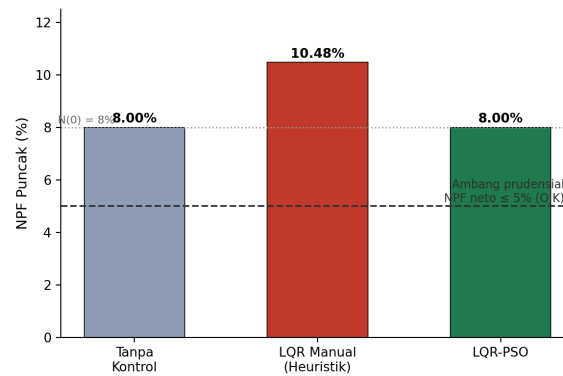
Otoritas Jasa Keuangan (OJK) menetapkan ambang rasio prudensial Non-Performing Financing (NPF) netto maksimal 5% sebagai acuan kualitas pembiayaan yang sehat bagi bank umum syariah di Indonesia. Kajian empiris terbaru menunjukkan bahwa determinan NPF perbankan syariah bersifat asimetris antara periode sebelum dan sesudah tekanan makroekonomi (krisis, pandemi), dengan sebagian bank mengalami lonjakan signifikan pada segmen pembiayaan berisiko tinggi seperti UMKM (Fakhrunnas, F., Nuri, R., Nugrohowati, I., Haron, R., Bkti, M., & Anto, 2022). Pada level industri global, laporan stabilitas keuangan syariah tahun 2024 mencatat variasi rasio pembiayaan bermasalah yang cukup lebar antarnegara dan antarsegmen, sehingga penilaian stabilitas kinerja bank syariah tidak dapat digeneralisasi secara tunggal (Board, 2024). Dalam konteks ini, Tabel 5 menyajikan reposisi hasil simulasi dari tiga skenario terhadap ambang prudensial tersebut.

Tabel 5. Reposisi Hasil Simulasi terhadap Ambang Prudensial NPF dan Implikasi Risiko

Skenario	NPF Puncak Simulasi (%)	Ambang Prudensial NPF Neto OJK	Implikasi terhadap Mitigasi Risiko
Tanpa Kontrol	8,00	$\leq 5,00\%$	Tidak ada mekanisme koreksi otomatis; risiko murni mengikuti dinamika alami sistem
LQR Manual (Heuristik)	10,48	$\leq 5,00\%$	Overshoot tertinggi; kesalahan tuning bobot Q, R memperbesar risiko transien melebihi kondisi awal
LQR-PSO	8,00	$\leq 5,00\%$	Tidak overshoot; peningkatan risiko transien sepenuhnya tercegah, konsisten dengan prinsip ihtiyath

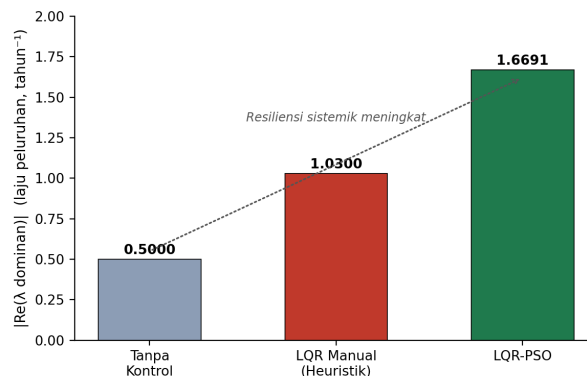
Tabel 5 menegaskan satu temuan penting yang melampaui perbandingan ISE/ITAE semata: dari ketiga skenario, hanya LQR-PSO yang berhasil menahan laju NPF agar tidak melampaui kondisi awalnya, sedangkan LQR manual justru memperbesar eksposur risiko hingga melampaui titik awal sebelum sistem pulih. Pola ini konsisten dengan temuan (Widarjono, A., & Mardhiyah, 2022) bahwa kebijakan pembiayaan bagi hasil (*profit-loss sharing*) yang dirancang tanpa mekanisme penyesuaian yang optimal cenderung melemahkan, bukan memperkuat, stabilitas perbankan syariah, sedangkan penyesuaian nisbah berbasis data dan teroptimasi memberikan kontribusi positif terhadap stabilitas.

Gambar 4. Reposisi NPF Puncak Tiga Skenario terhadap Ambang Prudensial OJK (5%)



Gambar 4 memvisualisasikan secara langsung jarak (*margin*) antara puncak NPF hasil simulasi dan ambang prudensial. Meskipun secara absolut ketiga skenario masih berada di atas ambang 5% akibat kondisi awal ilustratif $N(0) = 8\%$ yang memang berada di luar tingkat kesehatan tersebut, sudut pandang yang lebih relevan untuk mitigasi risiko adalah margin relatif terhadap kondisi awal, bukan nilai absolut semata. LQR-PSO adalah satu-satunya kebijakan yang tidak menambah margin risiko baru, sementara LQR manual memperlebar margin tersebut sebesar 2,48 poin persentase. Temuan ini sejalan dengan tinjauan sistematis mengenai praktik manajemen risiko pada bank syariah yang menekankan bahwa efektivitas kerangka mitigasi risiko tidak semata ditentukan oleh ketersediaan instrumen kontrol, melainkan oleh ketepatan kalibrasi parameter kontrol tersebut (Hasan & Sholihin, 2022).

Gambar 5. Percepatan Laju Peluruhan Gangguan Berbasis Posisi Pole Dominan



Gambar 5 menyajikan perspektif komplementer berbasis teori kestabilan sistem dinamik: semakin besar nilai mutlak bagian real pole dominan, semakin cepat sistem meredam guncangan dan kembali ke ekuilibrium. LQR-PSO menghasilkan percepatan laju peluruhan gangguan sebesar 233,8% dibandingkan dengan sistem tanpa kontrol (dari 0,5000 menjadi 1,6691), jauh melampaui perbaikan yang dicapai oleh LQR manual (106,0%). Pendekatan berbasis eigenvalue/pole semacam ini sejalan dengan arus penelitian kontrol optimal yang belakangan mulai diterapkan pada masalah risiko likuiditas dan contagion di sektor perbankan konvensional (Mourad, H., Fahim, S., Burlea-Schiopoiu, A., Lahby, M., & Attioui, 2022), maupun pada optimasi manajemen aset-liabilitas bank dengan pendekatan pemrograman matematis (Peykani, P., Sargolzaei, M., Botshekan, M. H., Oprean-Stan, C., & Takaloo, 2023). Meskipun demikian, penerapan kombinasi LQR dan optimasi metaheuristik seperti Particle Swarm Optimization, pendekatan yang mulai terbukti efektif pada pemodelan peringatan dini risiko keuangan di sektor korporasi maupun rantai pasok (Yin, 2022) masih sangat jarang ditemukan secara spesifik pada konteks perbankan syariah dan kebijakan nisbah bagi hasil, sehingga memperkuat posisi

kebaruan (*novelty*) penelitian ini di persimpangan teori kontrol optimal, optimasi metaheuristik, dan ekonomi syariah.

Pembahasan

• Interpretasi Hukum Kontrol Optimal sebagai Kebijakan Nisbah Bagi Hasil Dinamis

Hukum kontrol optimal hasil tuning PSO, $u^*(t) = 0,5 - 1,3980(F-F^*) - 1,3760(R-R^*) + 1,7280(N-N^*)$, memberikan interpretasi ekonomi Islam yang konkret sebagai kebijakan penyesuaian nisbah bagi hasil (θ) yang bersifat dinamis dan berbasis data (data-driven dynamic profit-sharing ratio policy), bukan nisbah statis yang ditetapkan sekali di awal akad dan dibiarkan tetap sepanjang periode. Komponen $-1,3980(F-F^*)$: ketika volume pembiayaan F berada di bawah target ($F < F^*$), nisbah bagi hasil dinaikkan untuk mendorong minat nasabah/mudharib berakad mudharabah-musyarakah, mempercepat penyaluran pembiayaan menuju kapasitas optimal sejalan dengan prinsip ta'awun (tolong-menolong dalam kebaikan ekonomi) yang mendasari mekanisme bagi hasil.

Komponen $-1,3760(R-R^*)$: ketika ROA berada di bawah target, nisbah dinaikkan untuk memperbaiki profitabilitas bank sehingga kapasitas bank dalam menyerap risiko (risk absorption capacity) tetap terjaga, sebagai bagian dari prinsip menjaga keberlangsungan lembaga (hifz al-mal secara kelembagaan). Komponen $+1,7280(N-N^*)$: sekilas bertentangan dengan intuisi sederhana "turunkan nisbah saat risiko naik", namun sebagaimana telah dibahas sebelumnya, koefisien ini mencerminkan kebijakan optimal pada sistem yang saling terkait. Peningkatan nisbah saat NPF di atas target berfungsi menstimulasi pertumbuhan F dan R secara terkoordinasi sehingga, secara agregat (bukan secara parsial per variabel), menekan lintasan risiko keseluruhan, sebagaimana dibuktikan pada hasil simulasi (NPF puncak tetap 8%, tidak overshoot).

Stabilitas Kinerja: Analisis Berbasis Eigenvalue

Konsep 'stabilitas kinerja' dalam penelitian ini dioperasionalkan secara matematis melalui posisi nilai eigen sistem closed-loop pada bidang kompleks. Pergeseran pole dominan dari $\lambda = -0,5000$ (tanpa kontrol) menjadi $\lambda = -1,0300$ (LQR manual) dan $\lambda = -1,6691$ (LQR-PSO) merepresentasikan percepatan laju peluruhan gangguan (*disturbance decay rate*) sistem perbankan syariah terhadap guncangan eksternal. Dalam bahasa manajemen risiko perbankan, semakin negatif bagian real pole dominan, semakin cepat kinerja bank (F, R, N) kembali ke kondisi ekuilibrium yang sehat setelah terjadi guncangan makroekonomi atau lonjakan pembiayaan bermasalah, dengan kata lain, semakin tinggi resiliensi sistemik bank syariah terhadap guncangan. Eliminasi mode osilasi kompleks ($\lambda_{2,3} = -0,2641 \pm 0,0668i$ pada sistem tanpa kontrol menjadi *pole-pole real* pada kedua sistem terkendali) juga bermakna secara praktis: kebijakan nisbah dinamis menghilangkan potensi ayunan berulang (*boom-bust cycle kecil*) pada volume pembiayaan dan ROA yang secara alami masih mungkin terjadi tanpa intervensi kontrol.

• Mitigasi Risiko Pembiayaan: Perspektif Maqashid Syariah

Dari perspektif maqashid syariah, temuan bahwa LQR-PSO berhasil menghilangkan overshoot NPF (menjaga NPF puncak tetap di 8%, tidak melonjak melebihi kondisi awal) secara langsung merealisasikan kaidah fihiyyah dar'u al-mafasid muqaddamun ala jalb al-mashalih (mencegah kerusakan/risiko harus didahulukan daripada upaya meraih manfaat). Kebijakan nisbah bagi hasil yang dirancang secara heuristik (LQR manual), meskipun bermaksud baik, justru menimbulkan mafsadah tambahan berupa lonjakan NPF hingga 10,48%, melebihi level awal, sebelum akhirnya membaik. Sebaliknya, kebijakan hasil tuning PSO secara konsisten

menjaga agar risiko pembiayaan tidak pernah melampaui level awal yang telah teridentifikasi, sejalan dengan prinsip kehati-hatian (*ihtiyath*) yang menjadi salah satu pilar manajemen risiko perbankan syariah modern maupun regulasi prudensial OJK. Dengan demikian, kontribusi penelitian ini terhadap ekonomi syariah bukan sekadar menghasilkan angka kontrol yang optimal secara matematis, melainkan menyediakan instrumen kebijakan nisbah bagi hasil yang secara simultan menjaga *hifz al-mal* (perlindungan harta, dalam hal ini aset dan modal bank serta dana pihak ketiga) serta keberlanjutan fungsi intermediasi bank syariah bagi sektor riil.

- **Implikasi terhadap Stabilitas Kinerja dan Mitigasi Risiko Pembiayaan**

Untuk memperdalam pembahasan sebelumnya, temuan penelitian ini perlu ditempatkan secara eksplisit di antara perkembangan literatur empiris dan metodologis dalam lima tahun terakhir mengenai stabilitas dan risiko pembiayaan perbankan syariah, agar kontribusinya dapat dinilai secara proporsional, bukan sekadar diklaim secara normatif. Pertama, dari sisi kebijakan bagi hasil, (Widarjono, A., & Mardhiyah, 2022) menemukan bahwa pembiayaan berbasis profit-loss sharing berkontribusi terhadap stabilitas perbankan syariah di Indonesia apabila diiringi tata kelola risiko yang memadai, namun berpotensi menjadi sumber kerapuhan apabila nisbah ditetapkan secara statis tanpa penyesuaian terhadap kondisi bank yang berubah. Hukum kontrol optimal $u^*(t)$ hasil tuning PSO pada penelitian ini secara langsung menjawab celah tersebut dengan memformalkan penyesuaian nisbah sebagai fungsi deviasi F , R , dan N terhadap target, bukan sebagai konstanta yang ditetapkan sekali di awal akad. Temuan ini juga sejalan dengan bukti empiris terbaru bahwa pembiayaan berbasis bagi hasil (*profit and loss sharing*) berpengaruh positif terhadap profitabilitas bank syariah, sedangkan NPF berpengaruh negatif. Dengan demikian, efektivitas mekanisme bagi hasil sangat bergantung pada kualitas pembiayaan dan pengelolaan risiko, bukan semata-mata pada intensitas penyaluran pembiayaan (Hamidi, Rusgianto, Sani, & Adawiyah, 2025).

Kedua, dari sisi determinan risiko pembiayaan, (Fakhrunnas, F., Nuri, R., Nugrohowati, I., Haron, R., Bakti, M., & Anto, 2022) menunjukkan bahwa faktor-faktor penentu NPF pada perbankan syariah bersifat asimetris antara kondisi normal dan kondisi tertekan (pandemi, guncangan makro), sementara (Karima, N. K., Astary, J., Mamuji, M., Zamali, I., & Munir, 2024) mengonfirmasi bahwa variabel profitabilitas dan kapasitas permodalan turut memengaruhi tingkat NPF perbankan syariah nasional. Kedua temuan ini memperkuat relevansi struktur model tiga variabel (F , R , N) yang digunakan dalam penelitian ini: dengan memasukkan ROA (R) sebagai salah satu variabel status, model secara eksplisit menangkap keterkaitan antara profitabilitas dan risiko pembiayaan sebagaimana ditemukan secara empiris, alih-alih memperlakukan risiko pembiayaan sebagai variabel yang berdiri sendiri.

Ketiga, pada level risiko sistemik, kajian mengenai risiko likuiditas pendanaan pada bank pembiayaan rakyat syariah menemukan bahwa risiko aset dan risiko likuiditas saling berkelindan dan dapat saling memperkuat dalam kondisi guncangan (Widarjono, A., Wijayanti, D., & Suharto, 2022). Eliminasi mode osilasi kompleks pada sistem closed-loop hasil LQR-PSO dapat dibaca sebagai kontribusi terhadap pematuan mekanisme saling-memperkuat tersebut pada level model matematis, karena osilasi berulang pada F dan R adalah salah satu jalur penularan risiko ke variabel N . Pada level industri secara lebih luas, laporan stabilitas jasa keuangan syariah global mencatat bahwa ketahanan bank syariah terhadap guncangan eksternal masih bervariasi signifikan antarnegara dan antarsegmen pembiayaan, sehingga instrumen kebijakan berbasis data-driven seperti yang diusulkan penelitian ini berpotensi menjadi salah satu pelengkap kerangka pengawasan makroprudensial (Board, 2024).

Keempat, dari sisi metodologis, penerapan teori kontrol optimal untuk memodelkan dan memitigasi risiko dalam sistem perbankan sesungguhnya merupakan arah penelitian yang baru mulai berkembang, terutama pada domain risiko likuiditas dan kontagion antarbank menggunakan pendekatan kontrol optimal berbasis model epidemiologis (Mourad, H., Fahim, S., Burlea-Schiopoiu, A., Lahby, M., & Attiou, 2022)(Fahim, S., Mourad, H., & Lahby, 2025) maupun optimasi program matematis untuk manajemen aset-liabilitas bank (Peykani, P., Sargolzaei, M., Botshekan, M. H., Oprean-Stan, C., & Takaloo, 2023). Di sisi lain, penerapan algoritma metaheuristik seperti Particle Swarm Optimization untuk menyetel parameter model risiko keuangan telah terbukti efektif dalam konteks peringatan dini risiko kredit korporasi dan risiko rantai pasok (Yin, 2022). Penelitian ini memperluas kedua arus literatur tersebut ke ranah yang belum banyak tersentuh: integrasi LQR dan PSO secara hibrid untuk merumuskan kebijakan nisbah bagi hasil dinamis pada perbankan syariah, sebuah kombinasi yang sejauh penelusuran literatur belum banyak dibahas secara eksplisit dalam konteks ekonomi Islam.

• **Implikasi Praktis dan Kebijakan bagi Manajemen Risiko Perbankan Syariah**

Secara praktis, kebijakan nisbah bagi hasil dinamis hasil tuning PSO berpotensi diintegrasikan ke dalam praktik Asset Liability Committee (ALCO) bank syariah sebagai salah satu input pendukung pengambilan keputusan, melengkapi sistem peringatan dini NPF yang selama ini umumnya bersifat deskriptif-statistik (Hasan, N. I., & Sholihin, 2022). Alih-alih menunggu NPF melampaui ambang tertentu sebelum bereaksi, kebijakan berbasis kontrol optimal memungkinkan penyesuaian nisbah dilakukan secara proaktif berdasarkan deviasi F, R, dan N dari target sebelum risiko benar-benar terealisasi.

Perkembangan infrastruktur teknologi finansial pada perbankan syariah turut membuka peluang untuk implementasi praktis kebijakan semacam ini. Kajian terbaru mengenai manajemen risiko perbankan syariah berbasis teknologi finansial menunjukkan bahwa integrasi sistem informasi risiko yang lebih real-time memungkinkan bank merespons perubahan indikator kinerja dengan lebih cepat dan terukur (Al Hammadi, M., 2024). Dalam kerangka ini, hukum kontrol $u^*(t)$ yang dihasilkan penelitian ini secara teknis dapat diprogramkan ke dalam sistem inti perbankan (core banking system) sebagai modul pendukung keputusan penetapan nisbah periodik, tanpa memerlukan intervensi manual yang rentan terhadap bias heuristik sebagaimana ditunjukkan oleh buruknya kinerja skenario LQR manual pada penelitian ini.

Bagi regulator (OJK) dan Dewan Syariah Nasional-MUI, hasil penelitian ini menawarkan argumen kuantitatif bahwa kebijakan nisbah bagi hasil yang optimal dan adaptif dapat menjadi salah satu instrumen mitigasi risiko pembiayaan yang selaras dengan prinsip kehati-hatian (ihtiyath) dan kaidah dar'u al-mafasid muqaddamun ala jalb al-mashalih, sekaligus tetap berada dalam koridor akad mudharabah-musyarakah yang sah secara syariah karena penyesuaian nisbah tetap mengikuti kesepakatan proporsi bagi hasil, bukan menetapkan imbal hasil pasti (fixed return) yang menyerupai riba. Dengan demikian, kontribusi praktis penelitian ini melengkapi kontribusi teoretis yang telah diuraikan sebelumnya. Penelitian ini tidak hanya menyediakan bukti kuantitatif keunggulan kontrol optimal hibrid, tetapi juga peta jalan konkret bagi implementasinya dalam tata kelola risiko perbankan syariah kontemporer.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pemodelan, linearisasi, perancangan kontrol, dan simulasi komparatif yang telah diuraikan pada bagian Hasil dan Pembahasan, penelitian ini menyimpulkan bahwa penentuan bobot matriks Q dan R pada Linear Quadratic Regulator melalui optimasi Particle Swarm Optimization terbukti secara konsisten unggul dibandingkan dengan penentuan bobot

secara heuristik. Alih-alih bergantung pada proses trial-and-error yang tidak menjamin optimalitas dan bahkan terbukti kontraproduktif, tuning berbasis PSO menghasilkan hukum kontrol optimal yang secara kuantitatif lebih andal dalam menjaga stabilitas kinerja sekaligus mencegah eskalasi risiko pembiayaan.

Dari perspektif stabilitas kinerja, sistem yang dikendalikan dengan skema LQR-PSO menunjukkan percepatan laju peluruhan gangguan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan baik sistem tanpa kontrol maupun LQR dengan bobot manual, sehingga bank pulih lebih cepat dan lebih halus dari guncangan makroekonomi tanpa menyisakan mode osilasi yang berulang. Dari perspektif mitigasi risiko pembiayaan, hanya skenario LQR-PSO yang berhasil menahan lonjakan NPF agar tidak melampaui kondisi awalnya, sementara LQR manual justru memperbesar eksposur risiko secara transien sebelum sistem akhirnya stabil. Kedua temuan ini saling berkaitan: kecepatan peredaman gangguan pada LQR-PSO memungkinkan sistem menahan laju kenaikan NPF sejak dini, sedangkan respons yang lebih lambat pada LQR manual memberi ruang bagi risiko pembiayaan untuk sempat membengkak sebelum akhirnya terkendali. Secara keseluruhan, pendekatan LQR-PSO terbukti mampu mencegah eskalasi kerugian finansial yang berpotensi fatal bagi industri pembiayaan syariah.

Hukum kontrol optimal hasil tuning PSO dapat diinterpretasikan sebagai kebijakan nisbah bagi hasil yang dinamis dan berbasis data, bukan nisbah statis yang ditetapkan sekali di awal akad dan dibiarkan tetap sepanjang periode. Secara khusus, kebijakan ini secara konsisten mencegah risiko pembiayaan melampaui level awal yang telah teridentifikasi, sehingga merealisasikan kaidah fiqhiyyah *dar'u al-mafasid muqaddamun 'ala jalb al-mashalih* serta prinsip *ihthiyath*. Dengan demikian, penelitian ini bukan sekadar menghasilkan solusi optimasi matematis, melainkan menawarkan instrumen kebijakan yang secara simultan menjaga *hifz al-mal* dan keberlanjutan fungsi intermediasi bank syariah, sekaligus memperkuat posisi novelty penelitian pada titik temu matematika terapan dan ekonomi syariah.

Dari perspektif tata kelola, temuan ini memiliki dua implikasi strategis yang saling melengkapi. Pertama, terkait keberlanjutan kemaslahatan dan stabilitas kinerja, integrasi PSO berhasil mengeliminasi mode osilasi yang merefleksikan kerentanan inheren dalam dinamika perbankan syariah, sehingga mengubahnya menjadi lintasan pemulihan yang konvergen secara monoton menuju kondisi ideal. Kondisi ini memungkinkan profitabilitas dan volume pembiayaan berbasis bagi hasil bergerak menuju target secara bertahap, sekaligus memitigasi ketidakpastian akibat fluktuasi ekstrem demi menjaga keadilan distributif bagi seluruh pemangku kepentingan.

Kedua, terkait mitigasi risiko pembiayaan berbasis *hifz al-mal*, pendekatan hibrid LQR-PSO terbukti menjadi satu-satunya skenario kebijakan yang mampu menahan lonjakan risiko pembiayaan tanpa gejala transien, berbanding terbalik dengan manajemen risiko konvensional-heuristik yang justru kontraproduktif dan berisiko melanggar ambang prudensial regulator. Melalui kerangka integrasi ini, manajemen bank syariah dapat menerapkan prinsip kehati-hatian secara presisi melalui tindakan preventif berupa penyesuaian nisbah bagi hasil yang responsif terhadap deviasi variabel sistem, alih-alih bersikap reaktif terhadap pembiayaan bermasalah yang sudah terjadi. Kebijakan berbasis data semacam ini pada akhirnya memberikan perlindungan terhadap kesehatan aset institusi serta keamanan dana pihak ketiga, sebagai perwujudan nyata dari prinsip perlindungan harta dalam maqashid syariah.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Hammadi, M., et al. (2024). Risk Management in Islamic Banking: The Impact of Financial Technologies through Empirical Insights from the UAE. In *Risks* (Vol. 12, Issue 2).
- Ascarya. (2012). *Alur transmisi dan efektifitas kebijakan moneter ganda di Indonesia*. Buletin

- Ekonomi Moneter dan Perbankan* (14th ed., pp. 283–315).
- Board, I. F. S. (2024). Islamic Financial Services Industry Stability Report 2024. In *IFSB*. Kuala Lumpur.
- Chow, G. C. (1970). Optimal stochastic control of linear economic systems. *Journal of Money, Credit and Banking*, 2(3), 291–302. <https://doi.org/10.2307/1991477>
- Darrat, A. F. (2002). The relative efficiency of interest-free monetary system: Some empirical evidence. *Journal of Economic Studies*, 29(5), 345–367. <https://ideas.repec.org/a/eee/quaeo/v42y2002i4p747-764.html>
- Fahim, S., Mourad, H., & Lahby, M. (2025). Modeling and Mathematical Analysis of Liquidity Risk Contagion in the Banking System Using an Optimal Control Approach. *AppliedMath*, 5(1), Article 20.
- Fakhrunnas, F., Nuri, R., Nugrohowati, I., Haron, R., Bekti, M., & Anto, H. (2022). The Determinants of Non-Performing Loans in the Indonesian Banking Industry: An Asymmetric Approach Before and During the Pandemic Crisis. *Sage Open*, 12(4), 1–13.
- Gaing, Z. L. (2004). A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(2), 384–391. <https://doi.org/10.1109/TEC.2003.821821>
- Hamidi, I., Rusgianto, S., Sani, K., & Adawiyah, R. (2025). Does the Risk and Financing Structure Affect Islamic Bank Performance in Indonesia? *Journal of Islamic Economics and Finance Studies*, 6(2).
- Hasan, N. I., & Sholihin, A. I. (2022). Risk Management Practices in Islamic Banks: Evidence from Indonesia. *Journal of Islamic Accounting and Business Research*, 13(6), 895–912.
- Ibrahim, Y. (2022). Bank Syariah dan Bank Konvensional: (Suatu Analisis Perbedaan dan Prinsip-Prinsipnya). *Syarah: Jurnal Hukum Islam dan Ekonomi*, 11(1), 1–15.
- Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, 82(1), 35–45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>
- Karima, N. K., Astary, J., Mamuji, M., Zamali, I., & Munir, M. (2024). Faktor yang Mempengaruhi Non Performing Financing Perbankan Syariah di Indonesia. *Islamic Economics and Business Review*, 3(1), 514–527.
- Kennedy J, E. R. (1995). Particle Swarm Optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, 4, 1942–1948.
- Kuangan, O. J. (2023). Statistik perbankan syariah: Desember 2023. *Otoritas Jasa Keuangan*.
- Khan, M. S., & Mirakhor, A. (1992). Islam and the economic system. *Review of Islamic Economics*, 2(1), 1–29.
- Mourad, H., Fahim, S., Burlea-Schiopoiu, A., Lahby, M., & Attioui, A. (2022). Modeling and Mathematical Analysis of Liquidity Risk Contagion in the Banking System. *Journal of Applied Mathematics*, Article 5382153.
- Nuralim, A., & Jawab, A. R. (2023). Implementasi Mudharabah dan Musyarakah dalam Lembaga Perbankan Syariah. *ULIL ALBAB: Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, 2(11), 5456–5469.
- Peykani, P., Sargolzaei, M., Botshekan, M. H., Oprean-Stan, C., & Takaloo, A. (2023). Optimization of Asset and Liability Management of Banks with Minimum Possible Changes. *Mathematics*, 11(2), 2761.
- Widarjono, A., & Mardhiyah, Z. (2022). Profit-Loss Sharing Financing and Stability of Indonesian Islamic Banking. *International Journal of Islamic Business and Economics (IJIBEC)*, 6(1), 1–16.
- Widarjono, A., Wijayanti, D., & Suharto, S. (2022). Funding Liquidity Risk and Asset Risk of Indonesian Islamic Rural Banks. *Cogent Economics & Finance*, 10(1), 2059911.
- Yin, G. (2022). Supply Chain Financial Default Risk Early Warning System Based on Particle Swarm Optimization Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, Article 7255967.