

**PEMODELAN MATEMATIKA PENGGUNAAN *E-MONEY* PADA
E-PARKING MENGGUNAKAN MODEL SIRI**

Skripsi

Oleh

**EKA IVANA BR SITEPU
NPM. 2217031090**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

ABSTRACT

A MATHEMATICAL MODEL OF E-MONEY USAGE IN E-PARKING USING THE SIRI MODEL

By

Eka Ivana Br Sitepu

The implementation of non-cash payment systems (e-money) in e-parking services aims to improve efficiency and user convenience. However, in practice, there is still a tendency for users to return to cash payments, raising concerns about the sustainability of e-money usage. This study aims to analyze the dynamics of e-money adoption in e-parking systems using a mathematical modeling approach.

The model employed in this study is the SIRI model, which considers e-money adoption as a dynamic and non-permanent behavioral process. The parking user population is divided into three compartments: potential users, cash payment users, and e-money users. The analysis includes the determination of equilibrium points, stability analysis, and the calculation of the basic reproduction number using the Next Generation Matrix method. Numerical simulations are also conducted to illustrate the system dynamics over time.

The results show that the obtained basic reproduction number is less than one, indicating that e-money adoption is not sufficiently strong to be sustained in the long term. Numerical simulations reveal that although the number of e-money users increases, cash payments remain the stable condition of the system. Therefore, it can be concluded that the successful implementation of e-parking systems depends not only on technological availability but also on consistent user behavior and adequate policy support.

Keywords: Equilibrium Point, Bifurcation, Basic Reproduction Numbers, E-Money, E-Parking, SIRI Model .

ABSTRAK

PEMODELAN MATEMATIKA PENGGUNAAN *E-MONEY* PADA *E-PARKING* MENGGUNAKAN MODEL SIRI

Oleh

Eka Ivana Br Sitepu

Penerapan sistem pembayaran non-tunai (e-money) pada layanan e-parking bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dan kenyamanan pengguna. Namun, dalam implementasinya masih ditemukan kecenderungan pengguna untuk kembali menggunakan pembayaran tunai, sehingga keberlanjutan penggunaan e-money perlu dikaji lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dinamika adopsi e-money pada sistem e-parking melalui pendekatan pemodelan matematika.

Model yang digunakan adalah model SIRI, yang memandang adopsi e-money sebagai suatu proses perubahan perilaku pengguna yang bersifat dinamis dan tidak permanen. Populasi pengguna parkir dibagi ke dalam tiga kompartemen, yaitu pengguna potensial, pengguna pembayaran tunai, dan pengguna pembayaran non-tunai (e-money). Analisis dilakukan dengan menentukan titik kesetimbangan, menganalisis kestabilan sistem, serta menghitung bilangan reproduksi dasar menggunakan metode Next Generation Matrix. Selain itu, simulasi numerik dilakukan untuk menggambarkan dinamika sistem terhadap waktu.

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai bilangan reproduksi dasar yang diperoleh lebih kecil dari satu, yang mengindikasikan bahwa adopsi e-money belum mampu bertahan secara berkelanjutan dalam sistem. Simulasi numerik memperlihatkan bahwa meskipun jumlah pengguna e-money meningkat, pembayaran tunai tetap menjadi kondisi yang stabil dalam jangka panjang. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa keberhasilan penerapan e-parking tidak hanya bergantung pada ketersediaan teknologi, tetapi juga pada konsistensi perilaku pengguna serta dukungan kebijakan yang memadai.

Kata-kata kunci: Titik Equilibrium, Bifurkasi, Bilangan Reproduksi Dasar, Uang Elektronik, Parkiran Elektronik, Model SIRI

**PEMODELAN MATEMATIKA PENGGUNAAN *E-MONEY* PADA
E-PARKING MENGGUNAKAN MODEL SIRI**

EKA IVANA BR SITEPU

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar
SARJANA MATEMATIKA

Pada

Jurusan Matematika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

Judul Skripsi : **Pemodelan Penggunaan *E-money* pada
E-parking Menggunakan Model SIRI**

Nama Mahasiswa : **Eka Ivana Br Sitepu**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2217031090**

Program Studi : **Matematika**

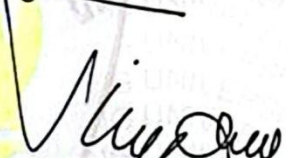
Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing




Dr. Agus Sutrisno, S.Si., M.Si.
NIP 198406272006042001



Drs. Tiryono/Ruby, M.Sc., Ph.D.
NIP 198002062003121003

2. Ketua Jurusan Matematika



Dr. Aang Nuryaman, S.Si., M.Si.
NIP. 197403162005011001


MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Agus Sutrisno, S.Si., M.Si.**



Sekretaris : **Drs. Tiryono Ruby, M.Sc., Ph.D.**



Penguji

Bukan Pembimbing : **Dr. Muslim Ansori, S.Si., M.Si.**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Hori Satria, S.Si., M.Si.

NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 26 Januari 2026

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Eka Ivana Br Sitepu
Nomor Pokok Mahasiswa : 2217031090
Jurusan : Matematika
Judul Skripsi : **Pemodelan Penggunaan *E-money* pada
E-parking Menggunakan Model SIRI**

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri. Apabila kemudian hari terbukti bahwa skripsi ini merupakan hasil salinan atau dibuat oleh orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan akademik yang berlaku.

Bandar Lampung, 26 Januari 2026

Penulis.



Eka Ivana Br Sitepu

RIWAYAT HIDUP

Penulis memiliki nama lengkap Eka Ivana Br Sitepu yang lahir pada tanggal 24 September 2004 di Kabanjahe, Sumatera Utara. Terlahir dari keluarga pasangan Bapak Salmon Sitepu dan Ibu Jusniar Sipayung, A.Md yang merupakan anak pertama dari dua bersaudara.

Penulis menyelesaikan pendidikan di Taman Kanak-kanak Xaverius Kabanjahe pada tahun 2010. Pendidikan sekolah dasar di SD Swasta Sint Yoseph Kabanjahe pada tahun 2016. Pendidikan sekolah menengah pertama di SMP Santo Xaverius 1 Kabanjahe pada tahun 2019. Pendidikan sekolah menengah atas di SMAN 1 Kabanjahe pada tahun 2022. Kemudian penulis diterima sebagai mahasiswa jurusan Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung pada tahun 2022 melalui jalur SBMPTN.

Sebagai bentuk aplikasi bidang ilmu di dunia kerja, penulis telah melaksanakan Kerja Praktik (KP) selama empat puluh hari di Bank BRI Unit Way Halim Bandar Lampung pada tahun 2025. Dan sebagai bentuk aplikasi bidang ilmu kepada masyarakat, penulis telah melakukan Kuliah Kerja Nyata (KKN) Mandiri selama 40 hari di Desa Kistang, Kecamatan Abung Barat, Kabupaten Lampung Utara, Lampung.

KATA INSPIRASI

“Ora Et Labora”

“Janganlah hendaknya kamu kuatir tentang apa pun juga, tetapi nyatakanlah dalam segala hal keinginanmu kepada Allah dalam doa dan permohonan dengan ucapan syukur.”

(Filipi 4:6)

“Tuailah setiap pengetahuan, kebijaksanaan, dan kegagalan sebagai pelajaran. Lalu tinggalkan masa lalu dan teruslah melangkah maju.”

(Salmon Sitepu)

PERSEMBAHAN

Dengan penuh Syukur kepada Tuhan Yesus Kristus oleh kasih dan penyertaan-nya yang sempurna senantiasa memberkati, mengaruniai dan memampukan penulis sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik dan tepat pada waktunya. Dengan rasa syukur dan Bahagia, saya persembahkan rasa terimakasih saya kepada:

Bapak Mamak Tersayang

Terima Kasih atas segala perjuangan serta pengorbanan, juga atas kasih, doa, dukungan, motivasi kepada penulis semasa hidup. Terimakasih tetap setia mengajarkan hal-hal baik di kehidupan ini. Semoga selalu merasa bahagia, sehat dan kelak anakmu ini bisa menjadi kebanggaan keluarga dan orang banyak.

Dosen Pembimbing dan Pembahas

Terima kasih kepada dosen pembimbing dan pembahas yang sudah sangat membantu, memberikan motivasi, memberikan arahan serta ilmu yang berharga. Semoga kelak ilmu yang telah diajarkan bisa diaplikasikan dan diterapkan sehingga bermanfaat bagi banyak orang.

Sahabat-sahabatku

Terima kasih untuk perjalanan yang penuh makna ini. Kelak ketika Tuhan mempertemukan kita di masa depan nanti, mari bertemu dengan iringan cerita kesuksesan dalam perjalanan hidup kita masing-masing.

Almamater Tercinta

Universitas Lampung

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus, atas segala kasih, berkat, penyertaan dan karunia-Nya yang melimpah sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pemodelan Matematika Penggunaan *E-money* pada *E-parking* Menggunakan Model SIRI”. Skripsi ini sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Matematika pada jurusan Matematika FMIPA Unila.

Tidak sedikit kendala yang penulis hadapi dalam pelaksanaan serta dalam proses penulisan skripsi ini, tetapi berkat penyertaan Tuhan Yesus Kristus juga bantuan dan semangat melalui orang-orang terkasih yang dipercaya membantu penulis sehingga skripsi ini dapat selesai dengan tepat waktu. Menyadari bahwa dalam menyusun penulisan skripsi ini tidak terlepas dari bimbingan, bantuan, dan kerjasama dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. Agus Sutrisno, S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing utama serta pembimbing akademik yang senantiasa membimbing dan memberikan arahan kepada penulis dari awal menjadi mahasiswa sampai pada tahap selesainya skripsi ini.
2. Bapak Drs. Tiryono Ruby, M.Sc., P.hD., selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan bimbingan, saran dan nasehat yang membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
3. Bapak Dr. Muslim Ansori, S.Si., M.Si., selaku penguji utama pada ujian skripsi. Terima kasih telah memberikan saran, pengarahan, nasehat dan bantuan yang sangat berharga pada seminar proposal dan hasil penelitian terdahulu.

4. Bapak Dr. Aang Nuryaman, S.Si., M.Si., selaku Ketua Jurusan Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., selaku dekan FMIPA Universitas Lampung.
6. Seluruh dosen, staff dan karyawan Jurusan Matematika FMIPA Universitas Lampung.
7. Bapak tercinta Salmon Sitepu, terima kasih selalu berjuang untuk kehidupan penulis. Beliau memang tidak sempat merasakan pendidikan sampai bangku perkuliahan, namun beliau mampu mendidik penulis, memotivasi, menuntun, memberikan dukungan, semangat serta selalu mengajarkan kebaikan dalam hidup penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan studinya sampai sarjana.
8. Mamak tercinta Jusniar Sipayung, A.md., terima kasih atas doa yang tidak pernah putus serta kasih sayang tulus yang senantiasa mendampingi setiap langkah penulis. Penulis meyakini bahwa setiap doa yang beliau panjatkan seperti benih yang tumbuh subur, berbuah lebat dan manis yang kelak tumbuh dan berahmat dalam perjalanan kehidupan penulis.
9. Adikku Theresia Evelin Gisella Br Sitepu yang juga memberikan doa dan perhatian serta semangat yang tak terhingga kepada penulis.
10. Yang tak kalah penting kehadirannya, Aldi Elieser Ginting, S.Pt., yang telah kebersamaian penulis selama penyusunan skripsi ini. Terima kasih sudah menjadi *support system* penulis lewat doa, tenaga, waktu, dukungan serta motivasi kepada penulis. Terima kasih untuk keluarga terkasih Bibik, Kila, Kakak, Abang yang setia memberi dukungan kepada penulis sehingga menjadi semangat bagi penulis dalam proses penyelesaian skripsi ini.
11. Sahabat satu perjuangan "*Besok bukber*", Mawar, Sa'diah dan Dwi Rizka yang setia saling mendukung, berjuang menyelesaikan skripsi nya masing-masing. Semoga setiap tawa, duka yang sudah kita alami bisa menjadi acuan lagi dalam kita mencapai impian kita.
12. Saudara yang sudah seperti keluarga diperantauan "*Portugal Gank*", Devinta, Titah, Puone, Sa'diah, Reivaldo, Luis, Rafael, Satria, Coky yang sudah menjadi teman layaknya keluarga tempat berbagi keluh kesah selama diperantauan.

Berawal dari makan siang sebanyak PORsi Tukang GaLi itu, semoga kenyang dari porsi itu mengiringi langkah kesuksesan kita semua di masa depan.

13. Seluruh pihak yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Akhir kata, Semoga Tuhan Yang Maha Pengasih dan Penyayang membalas kasih sayang kepada semua pihak yang telah membantu penulis. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, akan tetapi penulis berharap semoga karya kecil ini dapat memberikan informasi yang bermanfaat.

Bandar Lampung, 26 Januari 2026

Eka Ivana Br Sitepu

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>E-Money</i>	5
2.2 <i>E-Parking</i>	7
2.3 Pemodelan Matematika	7
2.4 Persamaan Diferensial	8
2.5 Sistem Persamaan Diferensial	9
2.6 Titik Equilibrium	10
2.7 Titik Kestabilan	10
2.8 Bifurkasi	11
2.9 Bilangan Reproduksi Dasar R_0	12
2.10 Analisa Model SIRI	13
III METODE PENELITIAN	15
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	15
3.2 Metode Penelitian	15
3.3 Alur Penelitian	17
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	18
4.1 Data Penelitian	18
4.2 Model Matematika	20
4.3 Penentuan Titik Keseimbangan (<i>Equilibrium</i>)	22
4.3.1 Titik Keseimbangan bebas tunai (E_0)	22
4.3.2 Titik Keseimbangan non tunai (E_1)	23
4.4 Analisis Kestabilan	25

4.4.1	Matriks Jacobian	25
4.4.2	Kestabilan Titik Kesetimbangan bebas tunai (E_0)	26
4.4.3	Kestabilan Titik Keseimbangan Tunai (E_1)	27
4.5	Bilangan Reproduksi Dasar (R_0)	28
4.5.1	Pembentukan Matriks F dan V	28
4.5.2	Menghitung bilangan Reproduksi Dasar (R_0)	30
4.6	Simulasi Model	31
V	KESIMPULAN DAN SARAN	34
5.1	Kesimpulan	34
5.2	Saran	35
	DAFTAR PUSTAKA	36

DAFTAR GAMBAR

3.1	Diagram Alur Penelitian	17
4.1	Diagram Transfer Model SIRI	20
4.2	Simulasi Model SIRI dengan Parameter Data Asli	31
4.3	Simulasi Model SIRI dengan Parameter Pembanding	32

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Perubahan besar dalam mekanisme transaksi di Indonesia telah berlangsung dengan laju tinggi, sejalan dengan kemajuan inovasi keuangan. Pergeseran dari metode pembayaran menggunakan uang fisik ke opsi tanpa non tunai tercermin dalam lonjakan adopsi uang elektronik, aplikasi dompet virtual (*e-wallet*), serta sistem pembayaran melalui kode QR. Perkembangan ini dipicu oleh keunggulan efisiensi dalam bertransaksi, aksesibilitas yang lebih mudah, dan dukungan aktif dari pemerintah untuk mempercepat transformasi digital dalam perekonomian. Penerapan model pembayaran bebas tunai menjadi elemen krusial untuk menjamin kelancaran serta kelangsungan perubahan ekonomi di tingkat nasional. Dari segi praktis, pengenalan sistem parkir elektronik mewakili salah satu contoh penggabungan teknologi modern ke dalam bidang layanan masyarakat dan bisnis. Sistem parkir elektronik turut berkontribusi pada peningkatan performa pelayanan, penyempurnaan alur transaksi, serta peningkatan akuntabilitas dalam mengelola pemasukan retribusi, sehingga dapat mengurangi risiko kecurangan yang sering muncul dalam pembayaran konvensional berbasis uang tunai (Vinanti *et al*, 2024).

Penerapan sistem parkir elektronik di sejumlah daerah mengungkapkan bahwa penerimaan pembayaran tanpa uang tunai belum mencapai tingkat maksimal. Walaupun opsi pembayaran elektronik, termasuk QRIS, dompet digital, dan kartu uang elektronik, sudah tersedia dan simpel digunakan, sebagian besar orang masih memilih transaksi dengan uang fisik. Kondisi ini dipicu oleh unsur-unsur seperti rutinitas harian, tingkat keyakinan pada platform digital, kurangnya pengetahuan tentang teknologi, serta hambatan teknis dan ketersediaan layanan. Penggunaan uang tunai bisa memunculkan masalah operasional, seperti hilangnya pemasukan retribusi dan lamanya waktu pelayanan yang mengakibatkan antrian panjang kendaraan. Di sisi lain, metode pembayaran non-tunai memberikan kemudahan

proses, peningkatan keamanan, dan pengelolaan pendapatan yang lebih transparan. Akan tetapi, tingkat penerimaan yang rendah di kalangan pengguna tertentu, seperti orang lanjut usia dan mereka yang kesulitan memahami teknologi, tetap menjadi hambatan besar. Ini menandakan bahwa efektivitas penerapan sistem parkir elektronik tidak hanya bergantung pada kesiapan peralatan teknologi, melainkan juga pada aspek perilaku dan kemampuan pengguna untuk menyesuaikan diri dengan perubahan cara pembayaran (Cheisvianny *et al*, 2023).

Dalam beberapa tahun belakangan, kajian tentang sistem parkir elektronik dan transaksi digital di Indonesia telah mengalami kemajuan signifikan. Kireina (2017) meneliti implementasi alat parkir otomatis sebagai elemen utama dalam pembangunan kota cerdas, sementara Pradipta & Hariani (2017) mengevaluasi efektivitas Terminal Parkir Elektronik (TPE). Meskipun demikian, mayoritas penelitian sebelumnya masih bergantung pada metode deskriptif, sehingga gagal menampilkan perubahan penerimaan uang elektronik secara numerik seiring berjalannya waktu, termasuk risiko kembalinya pengguna ke pembayaran konvensional. Situasi ini mengungkapkan celah dalam bidang riset, yang memberikan kesempatan untuk merancang model matematika guna mempelajari evolusi mekanisme transaksi di fasilitas parkir.

Dari segi metodologi, studi tentang penerimaan pembayaran elektronik masih banyak menggunakan metode survei lintas-waktu dengan bantuan kerangka *Technology Acceptance Model* (TAM), *Unified Theory of Acceptance and Use of Technology* (UTAUT), serta *Theory of Planned Behavior* (TPB). Kerangka-kerangka ini menekankan pada penemuan elemen utama yang memengaruhi penerimaan, termasuk manfaat yang dirasakan, kemudahan penggunaan yang dipersepsikan, tingkat kepercayaan, dan norma subjektif. Walaupun efektif dalam menggambarkan pilihan penerimaan pada momen spesifik, metode ini memiliki batasan untuk menggambarkan evolusi perilaku konsumen dari waktu ke waktu, sehingga tidak sepenuhnya mampu menangkap esensi proses penerimaan yang terus berubah.

Kajian ini menggabungkan metode pemodelan matematis yang sering diterapkan dalam riset epidemiologi ke dalam evaluasi sistem pembayaran elektronik. Di bidang ekonomi, pemanfaatan model yang membagi populasi menjadi berbagai kategori masih cukup jarang, terutama saat menggambarkan proses penerimaan teknologi. Karena itu, model SIR disesuaikan dan diperbaiki

untuk menggambarkan aspek sosial-ekonomi, melalui pembentukan model SIRI (*Susceptible–Infected–Recovered–Infected*) dalam konteks *e-parking*. Model tersebut mempertimbangkan kemungkinan kembali beralih dari *e-money* ke transaksi tunai karena masalah operasional, seperti saldo habis atau gangguan teknis. Fokus analisis terletak pada penghitungan parameter penting, seperti tingkat penerimaan *e-money*, kecepatan kembali ke pembayaran tunai, dan frekuensi penggunaan *e-money* lagi. Tambahan pula, dilakukan kalkulasi angka reproduksi dasar (R_0) beserta evaluasi stabilitas titik ekuilibrium untuk mempelajari pola penerimaan *e-money* dalam periode waktu tertentu. Contoh studi lokal diterapkan guna mendemonstrasikan kegunaan model dan sumbangsihnya pada kemajuan pemodelan penerimaan teknologi di sistem pembayaran digital di luar bidang medis.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana memodelkan dinamika penggunaan e-money pada sistem e-parking dengan pendekatan model matematika tipe SIRI?
2. Bagaimana menentukan titik keseimbangan (equilibrium) dan menganalisis kestabilan sistem penggunaan e-money pada e-parking?
3. Apakah nilai bilangan reproduksi dasar (R_0) memengaruhi peralihan pengguna dari pembayaran tunai ke pembayaran e-money?
4. Apakah terdapat fenomena bifurkasi pada sistem ketika parameter tertentu (misalnya laju peralihan α dan ψ) berubah?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Membangun model matematika tipe SIRI untuk menggambarkan perilaku pengguna parkir dalam memilih metode pembayaran (tunai atau e-money).
2. Menentukan titik equilibrium dan menganalisis kestabilan sistem berdasarkan parameter-parameter yang relevan.

3. Menghitung bilangan reproduksi dasar R_0 sebagai indikator transisi dari pembayaran tunai menuju pembayaran e-money.
4. Mengidentifikasi kemungkinan terjadinya bifurkasi akibat perubahan nilai parameter, sehingga dapat diketahui kondisi kritis peralihan dominasi tunai ke e-money.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu:

1. Manfaat Teoritis: Memberikan kontribusi dalam pengembangan model matematika berbasis SIRI untuk bidang ekonomi dan transportasi, khususnya terkait elektronifikasi pembayaran.
2. Manfaat Praktis: Memberikan gambaran bagi pemerintah daerah dan pengelola parkir tentang faktor-faktor yang memengaruhi dominasi penggunaan e-money.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *E-Money*

E-money, atau yang lebih dikenal sebagai uang elektronik, merupakan bentuk uang berbasis digital yang kini memegang peran sentral dalam perkembangan sistem pembayaran kontemporer. Inovasi ini memperbaiki efisiensi serta kemudahan saat bertransaksi, sehingga memungkinkan orang-orang melakukan pembayaran secara kilat dan tanpa kesulitan tanpa harus mengandalkan uang kertas (Firmansah, 2021). Gagasan tersebut berperan sebagai substitusi uang fisik dengan memanfaatkan perangkat elektronik, yang memungkinkan pengiriman nilai terjadi dalam sekejap mata melalui saluran seperti kartu pintar, aplikasi di gawai (contohnya OVO, Dana, GoPay, dan sebagainya), serta layanan daring.

Pertumbuhan uang elektronik di wilayah Asia Tenggara, khususnya Indonesia, mendapat dorongan kuat dari tingginya penggunaan ponsel pintar yang melebihi 80% pada tahun 2023, serta program-program pemerintah untuk memasukkan lebih banyak orang ke dalam sistem keuangan. Hal ini berujung pada kenaikan volume transaksi uang elektronik hingga 40% dari tahun 2022 ke 2023 (Mastercard, 2023). Gelombang pertumbuhan uang elektronik mulai terasa sejak tahun 2015, berkat munculnya platform seperti GoPay dan OVO yang terintegrasi erat dengan dunia perdagangan daring (Septiningrum *et al.*, 2024). Pasca pandemi COVID-19, adopsi uang elektronik melonjak drastis karena kebutuhan transaksi tanpa sentuhan fisik, dengan laju pertumbuhan global mencapai 25% setiap tahunnya antara 2020 dan 2023 (Statista, 2024). Regulasi resmi mengenai uang elektronik dimulai dengan terbitnya Peraturan Bank Indonesia Nomor 11/3/PBI/2009 tentang Penyelenggaraan Sistem Pembayaran, yang kemudian diperbaiki melalui PBI Nomor 18/40/PBI/2016 untuk menyesuaikan dengan kemajuan teknologi keuangan. Informasi terkini mengungkapkan lonjakan signifikan dalam penggunaan uang elektronik, terutama di Indonesia yang menjadi pasar fintech terbesar di ASEAN. Nilai total transaksi uang

elektronik mencapai Rp 500 triliun pada 2023, naik 32% dari Rp 378 triliun pada 2022, dengan 80% dari transaksi tersebut dilakukan lewat dompet digital seperti GoPay, OVO, dan Dana. Proyeksi menunjukkan bahwa pada tahun 2023, jumlah pengguna uang elektronik aktif di Indonesia akan mencapai 150 juta orang, yang sama dengan 55% dari populasi orang dewasa, didorong oleh keterkaitannya dengan layanan publik serta perdagangan elektronik. (BI, 2024).

Uang elektronik secara keseluruhan dapat diklasifikasikan ke dalam dua jenis utama, yakni yang berbasis kartu, seperti kartu Flazz dan e-Toll, serta yang berbasis akun, contohnya dompet digital seperti LinkAja atau Dana. Jenis berbasis kartu memanfaatkan chip RFID untuk mendukung transaksi tanpa perlu kontak fisik, sementara jenis berbasis akun lebih bergantung pada enkripsi data dan verifikasi biometrik untuk memastikan tingkat keamanan yang tinggi. Cara kerja uang elektronik dimulai dengan menambah saldo (top-up) melalui rekening bank atau sumber pendanaan lainnya, lalu nilai tersebut bisa dialihkan melalui sistem pembayaran elektronik.

E-money menawarkan keunggulan utama berupa kemudahan dan efisiensi, yang memungkinkan transaksi selesai dalam hitungan detik tanpa perlu menggunakan uang fisik. Selain itu, ia berkontribusi pada perluasan akses keuangan, terutama untuk kelompok masyarakat yang dulunya sulit menjangkau jasa perbankan tradisional, seperti mereka yang belum memiliki rekening bank. Faktor keamanan lainnya tercermin dalam penggunaan teknologi enkripsi serta verifikasi biometrik, yang secara signifikan menekan bahaya pencurian secara langsung. Meski demikian, ada beberapa hambatan penting yang patut diwaspadai, khususnya dalam bidang keamanan digital dan privasi informasi pribadi. Contohnya, ancaman seperti phishing dan malware terhadap sistem *e-money* telah menimbulkan kerugian duniawi mencapai 6 miliar dolar AS pada tahun 2023 (Cybersecurity Ventures, 2024). Di Indonesia, jumlah kejadian penipuan terkait *e-money* juga melonjak menjadi 1.200 kasus pada 2023, meningkat 15 % dibandingkan periode sebelumnya (BI, 2024). Tantangan tambahan muncul di ranah regulasi, terutama risiko pencucian uang yang perlu diawasi ketat.

2.2 E-Parking

Kemajuan pesat dalam bidang teknologi informasi dan komunikasi telah menjadi pendorong utama penerapan sistem digital pada berbagai aspek kehidupan, termasuk dalam pengelolaan transportasi dan layanan parkir. Salah satu bentuk penerapan tersebut adalah *electronic parking (e-parking)*, yakni mekanisme pembayaran parkir berbasis digital yang menggunakan sarana elektronik seperti uang elektronik dan aplikasi pada perangkat seluler. Melalui *e-parking*, proses pembayaran dapat dilakukan tanpa uang tunai sehingga transaksi berlangsung lebih praktis, cepat, dan efisien. Di samping itu, penerapan sistem ini mampu meningkatkan akuntabilitas pengelolaan retribusi parkir karena seluruh transaksi terekam secara otomatis dalam basis data sistem (Vinanti *et al.*, 2024). Kehadiran *e-parking* menjadi solusi atas berbagai permasalahan yang kerap dijumpai pada sistem parkir konvensional, seperti terjadinya antrean yang panjang, kendala ketersediaan uang tunai, serta risiko terjadinya kebocoran pendapatan (Cheisviyanny *et al.*, 2023).

2.3 Pemodelan Matematika

Definisi 2.3.1 Model adalah representasi penyederhanaan dari sebuah realita yang kompleks. Umumnya dirancang untuk memahami, menganalisis, dan memprediksi realita tersebut. Mempunyai ciri-ciri mempertahankan karakteristik utama dari realitanya sehingga tetap mencerminkan hubungan dan dinamika yang relevan dengan fenomena yang diteliti. Dengan demikian, Model adalah karakteristik umum yang mewakili sekelompok bentuk yang ada atau representasi suatu masalah dalam bentuk yang lebih sederhana dan mudah dikerjakan (Iswanto, 2022).

Model matematika yang diperoleh dari suatu masalah matematika yang diberikan, kemudian diselesaikan menggunakan aturan serta metode matematis yang berlaku. Setelah diperoleh hasil penyelesaian, dilakukan verifikasi atau pengujian validitas untuk memastikan bahwa solusi tersebut sesuai dengan model dan kondisi awal masalah. Hasil valid menunjukkan bahwa solusi tersebut dianggap mewakili jawaban yang benar terhadap model matematika yang dibangun. Apabila hasil yang diperoleh tidak valid dan tidak memenuhi syarat, maka dapat disimpulkan bahwa solusi yang dihasilkan belum tepat sehingga perlu dilakukan peninjauan atau pemodelan ulang.

agar diperoleh solusi yang lebih akurat dan representatif terhadap permasalahan yang dikaji (Cahyono, 2023).

2.4 Persamaan Diferensial

Definisi 2.4.1 Persamaan diferensial merupakan bentuk persamaan matematika yang memuat turunan dari satu atau beberapa variabel terikat terhadap satu atau beberapa variabel bebas. Persamaan Diferensial dibagi menjadi dua yaitu:

1. **Persamaan Diferensial Biasa (PDB)** adalah suatu persamaan diferensial jika fungsi yang tidak diketahui hanya bergantung pada satu peubah bebas atau hanya melibatkan satu variabel bebas. Bentuk umumnya adalah:

$$F\left(x, y, \frac{dy}{dx}, \frac{d^2y}{dx^2}, \dots, \frac{d^ny}{dx^n}\right) = 0$$

Contoh 2.4.2 Persamaan pertumbuhan eksponensial dapat dituliskan sebagai:

$$\frac{dy}{dt} = ky$$

di mana $y(t)$ adalah fungsi populasi seiring waktu t , dan k adalah konstanta pertumbuhan.

2. **Persamaan Diferensial Parsial (PDP)** adalah suatu persamaan diferensial yang melibatkan dua atau lebih peubah atau variabel bebas dan memuat turunan parsial dari fungsi yang tak diketahui. Bentuk umumnya adalah:

$$F\left(x_1, x_2, \dots, x_k, u, \frac{\partial u}{\partial x_1}, \frac{\partial^2 u}{\partial x_1 \partial x_2}, \dots, \frac{\partial^m u}{\partial x_i^m}\right) = 0$$

Contoh 2.4.3 Persamaan panas diberikan oleh:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2},$$

di mana $u(x, t)$ mewakili distribusi suhu sepanjang batang pada waktu t .

Suatu persamaan diferensial dikatakan linear jika:

- (i) Setiap variabel tak-bebas dan turunan-turunannya berderajat (berpangkat) satu.
- (ii) Tidak ada perkalian antar variabel tak-bebas dan/atau antar turunan-turunannya.

Apabila tidak memenuhi dua poin di atas maka persamaan diferensial tersebut dikatakan nonlinear (Rifandi & Abdy, 2023).

2.5 Sistem Persamaan Diferensial

Definisi 2.5.1 Sistem persamaan diferensial merupakan kumpulan dari dua atau lebih persamaan diferensial yang saling berkaitan dan menggambarkan hubungan dinamis antar variabel dalam suatu sistem. Di bawah ini diberikan sistem persamaan diferensial linear dan nonlinear sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\
 \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\
 &\vdots \\
 \dot{x}_n &= f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)
 \end{aligned} \tag{2.5.1}$$

Dengan $E \subset R^n$, dan $f : E \rightarrow R^n$ fungsi kontinu pada E sehingga diperoleh sistem sebagai berikut:

$$\dot{x} = f(x) \tag{2.5.2}$$

Jika $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ masing-masing linear dalam $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, maka sistem (2.5.2) disebut sistem diferensial linear yang dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n \\
 \dot{x}_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n \\
 \dot{x}_3 &= a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + \dots + a_{3n}x_n \\
 &\vdots \\
 \dot{x}_n &= a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + \dots + a_{nn}x_n
 \end{aligned} \tag{2.5.3}$$

Sistem (2.5.3) dapat dinyatakan dalam bentuk $\dot{x} = Ax$, dengan $x \in E$ dan A matriks $n \times n$. Sistem (2.5.2) disebut sistem nonlinear jika tidak dapat dinyatakan dalam bentuk sistem (2.5.3) (Nugroho, 2021).

2.6 Titik Equilibrium

Titik Equilibrium atau disebut dengan titik kesetimbangan merupakan titik yang tidak berubah terhadap waktu. Artinya pada saat $t=1,2,3,\dots,n$, nilai titik tersebut akan tetap dan tidak berubah.

Definisi 2.6.1 Diberikan suatu persamaan diferensial orde satu $\dot{x} = f(x)$, yang mempunyai solusi, dengan kondisi awal $x(0) = x_0$. Suatu vektor \bar{x} yang memenuhi $f(\bar{x}) = 0$ disebut titik equilibrium.

Analisis kestabilan suatu titik ekuilibrium dapat dilakukan dengan menggunakan matriks Jacobian. Nilai kestabilan tersebut ditentukan berdasarkan nilai eigen (λ_i) , dengan $i = 1, 2, 3, \dots, n$, yang diperoleh dari penyelesaian persamaan karakteristik $\det(\lambda I - A) = 0$, di mana I merupakan matriks identitas. Berdasarkan nilai eigen nya dapat ditentukan bahwa :

$$\begin{cases} (\lambda_i) < 0, & \text{sistem stabil asimtotik (stabil)} \\ (\lambda_i) > 0, & \text{sistem tidak stabil} \end{cases}$$

Dalam analisis model epidemiologi, terdapat dua jenis titik kesetimbangan. *disease-free equilibrium* (DFE) yang menggambarkan kondisi tanpa adanya infeksi, dan *endemic equilibrium* yang menunjukkan situasi ketika penyakit tetap ada dalam populasi. Kedua jenis kesetimbangan ini berperan penting, khususnya untuk menentukan apakah suatu infeksi akan terus berlangsung atau akhirnya menghilang dari populasi (Ihsan *et al.*, 2021).

2.7 Titik Kestabilan

Definisi 2.7.1 Titik tetap dari suatu pemetaan $T = M \rightarrow M$, dengan M merupakan suatu himpunan sembarang, dan $m \in M$ yang dipetakan pada dirinya sendiri oleh pemetaan tersebut. Dengan kata lain dibuat titik tetap oleh pemetaan tersebut T dan dinotasikan sebagai berikut:

$$T(m) = m.$$

Misalkan diberikan sistem persamaan:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= X(x, y, z), \\ \frac{dy}{dt} &= Y(x, y, z), \\ \frac{dz}{dt} &= Z(x, y, z).\end{aligned}$$

Titik (x', y', z') dengan $X(x', y', z') = 0$, $Y(x', y', z') = 0$, dan $Z(x', y', z') = 0$ disebut titik kritis persamaan. Titik kritis $E = (x_1^*, x_2^*, x_3^*)$ ini merupakan solusi persamaan di atas yang bernilai konstan sebab

$$\frac{dx}{dt} = 0, \quad \frac{dy}{dt} = 0, \quad \frac{dz}{dt} = 0,$$

disebut dengan keadaan stabil dan titik yang memenuhi disebut titik kestabilan (Sari, 2020).

2.8 Bifurkasi

Definisi 2.8.1 Secara umum, bifurkasi dapat didefinisikan sebagai perubahan kualitatif pada struktur atau kestabilan solusi suatu sistem diferensial akibat perubahan kecil pada nilai parameter sistem.

Secara matematis, pada sistem diferensial :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, \mu),$$

bifurkasi terjadi ketika parameter μ melewati nilai kritis μ_c , sehingga sifat kestabilan titik keseimbangan $x^*(\mu)$ berubah.

Dengan kata lain, bifurkasi menggambarkan situasi di mana sistem berpindah dari satu keadaan keseimbangan menuju keadaan keseimbangan lain ketika parameter melampaui suatu nilai ambang tertentu. Perubahan tersebut dapat berupa munculnya titik keseimbangan baru, pergeseran stabilitas, hingga transisi menuju perilaku osilatori. Bifurkasi terdiri dari empat jenis, yaitu:

1. Bifurkasi Saddle-Node

Bifurkasi saddle-node yang juga disebut *bifurkasi fold* ditandai ketika dua titik

ekuilibrium muncul atau hilang ketika parameter sistem melintasi batas kritis. Secara umum, proses ini melibatkan terbentuknya atau lenyapnya sepasang titik ekuilibrium (satu stabil dan satu tidak stabil).

2. Bifurkasi Hopf

Bifurkasi Hopf adalah perubahan perilaku yang terjadi dalam sistem ketika titik ekuilibrium berubah dari stabil menjadi tidak stabil (atau sebaliknya) dan menghasilkan solusi periodik.

3. Bifurkasi Pitchfork

Bifurkasi pitchfork adalah suatu kondisi ketika jumlah titik ekuilibrium dalam suatu sistem berubah dari satu menjadi tiga.

4. Bifurkasi Transkritikal

Bifurkasi transkritikal adalah bifurkasi yang terjadi pada saat perubahan parameter μ dalam sistem menyebabkan pertukaran kestabilan antara dua titik ekuilibrium, yaitu dari titik ekuilibrium yang stabil menjadi tidak stabil. (Kuznetsov, 2023) (Strogatz, 2024).

2.9 Bilangan Reproduksi Dasar R_0

Definisi 2.9.1 Bilangan reproduksi dasar (R_0), didefinisikan sebagai jumlah rata-rata kasus baru yang dihasilkan oleh satu individu yang terinfeksi dalam suatu populasi yang sepenuhnya rentan terhadap penyakit tanpa adanya intervensi seperti vaksinasi atau imunitas alami (Anderson & May, 1991).

Ada dua kondisi yang terjadi pada R_0 :

1. Jika $R_0 < 1$, artinya setiap individu yang terinfeksi menghasilkan kurang dari satu individu baru yang terinfeksi, atau dengan kata lain infeksi akan hilang dari populasi (stabil lokal asimtotik).
2. Jika $R_0 > 1$, artinya setiap individu yang terinfeksi akan menghasilkan lebih dari satu individu yang baru terinfeksi (tidak stabil).
3. Jika $R_0 = 0$, artinya setiap individu yang terinfeksi tidak menghasilkan individu baru yang terinfeksi sama sekali, atau dengan kata lain infeksi tidak dapat menyebar dalam sistem dan akan menghilang sepenuhnya dari populasi, (stabil lokal asimtotik). (Heffernan *et al*, 2005).

Pada model epidemiologi sederhana seperti model SIR, nilai R_0 dapat dirumuskan secara langsung sebagai perbandingan antara laju penularan (β) dengan laju pemulihan (γ), yaitu :

$$R_0 = \frac{\beta}{\gamma}.$$

Namun, pada model epidemiologi yang lebih kompleks misalnya ketika terdapat beberapa kelas infeksi, kompartemen tambahan, maupun faktor kontrol tertentu perhitungan nilai R_0 secara langsung menjadi lebih sulit dan membutuhkan pendekatan matematis yang lebih lanjut. Pendekatan matematis yang paling umum digunakan untuk menghitung R_0 adalah metode Next Generation Matrix (NGM). Secara umum, model diferensial dapat ditulis dalam bentuk:

$$\frac{dX}{dt} = F(X) - V(X),$$

dengan:

- $F(X)$: vektor laju infeksi baru,
- $V(X)$: vektor perpindahan individu antar kompartemen selain infeksi (pemulihan, kematian, dan sebagainya).

Kemudian, pada titik keseimbangan bebas infeksi (DFE), diturunkan dua matriks Jacobian:

$$F = \frac{\partial F}{\partial X}, \quad V = \frac{\partial V}{\partial X}.$$

Nilai bilangan reproduksi dasar R_0 diberikan oleh nilai eigen dominan (spectral radius) dari matriks FV^{-1} :

$$R_0 = \rho(FV^{-1}),$$

di mana $\rho(\cdot)$ menyatakan nilai eigen terbesar (modulus maksimum) dari matriks tersebut. (Diekmann *et al*, 1990).

2.10 Analisa Model SIRI

Model SIRI merupakan pengembangan dari model epidemiologi klasik SIR yang digunakan untuk menggambarkan dinamika populasi dengan kemungkinan terjadinya perpindahan ulang dari individu yang telah berada pada kondisi pulih

(R) ke kondisi terinfeksi(I). Berbeda dengan model SIR standar yang bersifat satu arah, model SIRI mengakomodasi proses transisi berulang yang mencerminkan sifat perilaku individu yang tidak permanen dan dapat berubah seiring waktu.(Buonomo, 2020).

Dalam berbagai kajian, model SIRI tidak hanya diterapkan pada penyebaran penyakit menular, tetapi juga digunakan untuk menganalisis dinamika penyebaran perilaku, adopsi teknologi, serta perubahan keputusan individu dalam sistem sosial dan ekonomi. Karakteristik utama model ini adalah adanya mekanisme kembalinya individu dari kelas *Recovered* ke kelas *Infected*, yang merepresentasikan hilangnya efek perlindungan atau kegagalan mempertahankan perilaku yang telah diadopsi sebelumnya.

pada konteks penggunaan *e-money* pada sistem *e-parking*, model SIRI digunakan untuk menggambarkan dinamika perilaku pengguna parkir dalam memilih metode pembayaran. Populasi pengguna parkir dikelompokkan ke dalam kelas *Susceptible* sebagai pengguna yang berpotensi menggunakan layanan parkir, kelas *Infected* sebagai pengguna yang melakukan pembayaran tunai, dan kelas *Recovered* sebagai pengguna yang telah menggunakan pembayaran non-tunai berupa *e-money*. Penggunaan model SIRI dalam penelitian ini didasarkan pada asumsi bahwa pengguna yang telah beralih ke *e-money* masih memiliki kemungkinan untuk kembali menggunakan pembayaran tunai akibat kendala teknis, seperti kehabisan saldo atau kehilangan kartu *e-money*.

Formulasi model SIRI dalam bentuk sistem persamaan diferensial memungkinkan dilakukan analisis matematis terhadap perilaku sistem, termasuk penentuan titik keseimbangan dan analisis kestabilan. Selain itu, model ini juga memungkinkan perhitungan bilangan reproduksi dasar R_0 sebagai indikator kecenderungan sistem, apakah penggunaan *e-money* akan meningkat atau justru pembayaran tunai tetap mendominasi dalam jangka waktu tertentu.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada semester ganjil tahun ajaran 2025/2026 di Jurusan Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung yang beralamat di Jalan Prof. Dr. Ir. Soemantri Brojonegoro, Gedong Meneng, Kecamatan Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Lampung.

3.2 Metode Penelitian

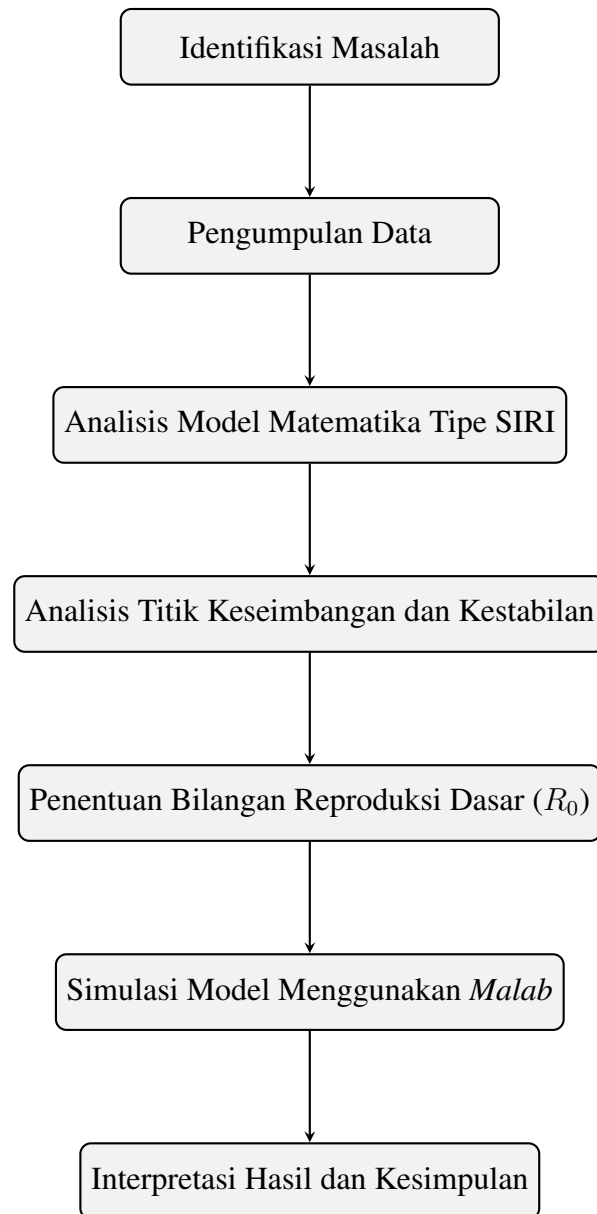
Penelitian ini dilakukan dengan studi literatur secara sistematis yang diperoleh dari jurnal online matematika yang terkait dengan materi SIR dan dengan membagikan kuisioner kepada sejumlah responden secara acak. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode pemodelan matematika. Pendekatan ini dipilih karena penelitian ini berfokus pada analisis numerik terhadap fenomena penggunaan *e-money* pada sistem *e-parking* melalui formulasi matematis dalam bentuk sistem persamaan diferensial. Hasil model yang dibangun digunakan untuk menjelaskan serta memprediksi perilaku masyarakat terhadap penggunaan *e-money* pada *e-parking*. Adapun langkah - langkah yang dilakukan dalam penelitian adalah

sebagai berikut:

1. Dilakukan pengumpulan bahan pustaka dari studi literatur dan hasil kuisioner, kemudian dilakukan studi proses pengkajian model.
2. Menentukan asumsi dalam model.
3. Menyusun model matematika SIRI (*Suscrptible-Infected-Recovered-Infected*) berupa sistem persamaan diferensial linear.

4. Menentukan titik kesetimbangan (equilibrium) untuk kondisi bebas tunai dan pembayaran tunai.
5. Menganalisis kestabilan di sekitar titik kesetimbangan dengan menentukan nilai eigen untuk mengetahui kestabilan sistem.
6. Menentukan bilangan reproduksi dasar (R_0), yang menunjukkan potensi peningkatan atau penurunan penggunaan uang tunai terhadap E-Money.
7. Melakukan simulasi model menggunakan perangkat lunak *Matlab* untuk menggambarkan perubahan populasi pengguna berdasarkan variasi parameter yang diperoleh dari survei.

3.3 Alur Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan pada bab sebelumnya, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Penggunaan *e-money* pada *e-parking* dengan menambahkan asumsi bahwa pengguna kendaraan berjenis *car* (mobil) yang telah menggunakan *emoney* dapat kembali menggunakan uang tunai pada pembayaran parkir akibat hilangnya kartu *e-money* dan kehabisan saldo kartu dapat dinyatakan dalam sistem persamaan diferensial sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= \mu_1 - (\mu_2 + \alpha) S \\ \frac{dI}{dt} &= \alpha S + (\beta + \theta) R - (\mu_2 + \psi) I \\ \frac{dR}{dt} &= \psi I - (\mu_2 + \beta + \theta) R\end{aligned}$$

2. Hasil dari analisis titik kesetimbangan pada sistem memiliki dua titik keseimbangan, yaitu titik keseimbangan bebas tunai dan titik keseimbangan pembayaran tunai. Titik keseimbangan bebas tunai diperoleh ketika jumlah pengguna yang melakukan pembayaran tunai bernilai nol, sedangkan titik keseimbangan pembayaran tunai muncul ketika pengguna tunai masih tetap bertahan dalam sistem. Keberadaan kedua titik ini menunjukkan bahwa sistem *e-parking* memiliki lebih dari satu kemungkinan kondisi jangka panjang, tergantung pada nilai parameter yang digunakan.
3. Analisis kestabilan lokal yang telah dilakukan menunjukkan bahwa kestabilan titik keseimbangan sangat dipengaruhi oleh nilai bilangan reproduksi dasar R_0 . Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa nilai R_0 sebesar 0.974 yang

diperoleh < 1 . Hasil simulasi menunjukkan bahwa meskipun adopsi *e-money* terus meningkat, pembayaran tunai tetap menjadi kondisi yang stabil dalam sistem *e-parking*. Hal ini menandakan bahwa adopsi *e-money* belum cukup kuat untuk menggantikan dominasi pembayaran tunai secara alami tanpa adanya intervensi tambahan.

4. Berdasarkan hasil analisis kestabilan dan simulasi numerik, dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat fenomena bifurkasi pada model penggunaan e-money pada sistem e-parking ketika parameter sistem berubah. Hal ini disebabkan karena model yang dibangun bersifat linear dengan matriks Jacobian konstan, sehingga perubahan parameter hanya memengaruhi nilai titik kesetimbangan tanpa mengubah jumlah maupun sifat kestabilannya. Ambang nilai bilangan reproduksi dasar $R_0 = 1$ merepresentasikan perubahan dominasi perilaku pengguna, namun tidak menunjukkan terjadinya bifurkasi dinamis pada sistem.
5. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa keberhasilan penerapan sistem pembayaran non-tunai pada e-parking tidak hanya bergantung pada ketersediaan teknologi, tetapi juga pada konsistensi perilaku pengguna serta dukungan kebijakan yang memadai. Tanpa adanya penguatan berupa edukasi, insentif, atau intervensi sistematis, adopsi e-money cenderung tidak dapat bertahan secara mandiri dan sistem akan kembali didominasi oleh pembayaran tunai.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan model dengan menambahkan faktor eksternal yang belum dimasukkan dalam penelitian ini, seperti kebijakan insentif penggunaan e-money, peningkatan infrastruktur digital, atau perilaku preferensi pengguna. Penambahan faktor tersebut diharapkan dapat memperkaya interpretasi hasil model terhadap kondisi nyata. Selain itu, parameter yang digunakan dalam penelitian ini masih bersifat statis. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan parameter yang bergantung pada waktu agar dinamika perubahan perilaku pengguna dapat tergambarkan dengan lebih realistis. Hasil penelitian ini diharapkan dapat dijadikan bahan pertimbangan bagi pengelola parkir dalam merancang strategi peningkatan adopsi e-money, terutama dengan menekan faktor-faktor yang menyebabkan pengguna kembali ke pembayaran tunai, seperti keterbatasan fasilitas pengisian saldo dan gangguan teknis sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- S. Vinanti, S. B. W. Subali, & Y. B. Kusuma, *Evaluation of the Growth, Obstacles, and Challenges of E-Money During the COVID-19 Pandemic*, KnE Social Sciences, pp. 201–209, 2024.
- C. Cheisviyanny, A. Rasli, S. Dwita, & V. F. Sari, *Illegal parking attendants and parking (mis)management: A case study in Padang, West Sumatra, Indonesia*, Asian Transport Studies, vol. 9, pp. 61–71, 2023.
- Kireina, N. F. (2017). *Mesin parkir elektronik sebagai wujud dari smart city di Kota Bandung*. JISPO: Jurnal Ilmu Sosial dan Ilmu Politik, 7(2), 63–80.
- Pradipta, R., & Hariani, D. (2017). *Efektivitas Program Terminal Parkir Elektronik*
- Zhiqiong Fu & Hiromi Seno. “SIRI+ Q model with a limited capacity of isolation.” *Theory in Biosciences*, vol. 144, no. 2, pp. 121–144, Springer, 2025.
- Rafli Firmansah, *Efektivitas Penggunaan E-Money Card dalam Meningkatkan Layanan Publik pada BRT (Bus Rapid Transit) Trans Banyumas*.
- Mastercard. (2023). *New payments index 2023: The future of payments in Asia Pacific*. Mastercard. Retrieved from <https://www.mastercard.com/news/perspectives/2023/new-payments-index-2023/>
- L. Septiningrum, N. Agustanta, M. Ahdiyana, H. W. Widiyanto, & A. Pambudi, *The Theoretical Framework of Cashless Payment Systems in Indonesia: Analyzing Condition in Different Era's*, Natapraja, vol. 12, no. 1, pp. 25–42, 2024.

Statista. (2024). *E-money and digital payments market worldwide - Statistics & facts*. Statista. Retrieved from <https://www.statista.com/topics/2346/e-money/>

Bank Indonesia. (2024). *Sistem pembayaran Indonesia: Statistik tahunan 2023*. Bank Indonesia. Retrieved from https://www.bi.go.id/id/publikasi/laporan/Pages/Statistik_Sistem_Pembayaran_2023.aspx

Cybersecurity Ventures. (2024). *Cybercrime magazine: Annual report on financial losses from cyber threats*. Cybersecurity Ventures. Retrieved from <https://cybersecurityventures.com/cybercrime-damages-6-trillion-by-2021/>

Iswanto, R. J. (2022). *Pemodelan matematika: Aplikasi dan terapannya*. Yogyakarta: Graha Ilmu.

Cahyono, E. (2023). *Pemodelan matematika*. Yogyakarta: Graha Ilmu.

Rifandi, M., & Abdy, M. (2023). *Suatu pengantar persamaan diferensial biasa*. Uwais Inspirasi Indonesia.

Nugroho, D. B. (2021). *Persamaan diferensial biasa dan aplikasinya*. Yogyakarta: ANDI Offset.

Ihsan, H., Side, S., & Pagga, M. (2021). *Pemodelan matematika SEIRS pada penyebaran penyakit malaria di Kabupaten Mimika*. *Journal of Mathematics, Computations and Statistics*, 4(1), 21–29.

Sari, D. I. P. (2020). *Model epidemi SIS dengan vaksinasi dan imigrasi* (Skripsi tidak diterbitkan). Malang: Universitas Brawijaya.

Kuznetsov, Y. A. (2023). *Elements of Applied Bifurcation Theory*. Springer.

Strogatz, S. H. (2024). *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. Chapman and Hall/CRC.

R. M. Anderson and R. M. May, *Infectious Diseases of Humans: Dynamics and Control*, Oxford University Press, 1991.

Heffernan, J. M., Smith, R. J., & Wahl, L. M. (2005). Perspectives on the basic reproductive ratio. *J. R. Soc. Interface*, 2(4), 281–293.

Diekmann, O., Heesterbeek, J. A. P., & Metz, J. A. J. (1990). On the definition and the computation of the basic reproduction ratio R_0 in models for infectious diseases in heterogeneous populations. *Journal of Mathematical Biology*, 28(4), 365–382. Springer.

Buonomo, B. Effects of information-dependent vaccination behavior on coronavirus outbreak: insights from a SIRI model. *Ricerche di Matematica*, 2020, **69**(2), 483–499. doi: 10.1007/s11587-020-00506-8. PMCID: PMC7144546.