

TUGAS AKHIR - KM184801

PENDEKATAN SISTEM DINAMIK UNTUK MENGANALISIS KESTABILAN CRYPTOCURRENCY

FELIX LYANTO SETIAWAN

NRP 06111940000041

Dosen Pembimbing

Endah Rokhmati M.P., Ph.D.

NIP 19761213 200212 2 001

Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si.

NIP 19870728 201404 2 001

Program Studi Sarjana

Departemen Matematika

Fakultas Sains dan Analitika Data

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2023



TUGAS AKHIR - KM184801

PENDEKATAN SISTEM DINAMIK UNTUK MENGANALISIS KESTABILAN CRYPTOCURRENCY

FELIX LYANTO SETIAWAN

NRP 06111940000041

Dosen Pembimbing

Endah Rokhmati M.P., Ph.D.

NIP 19761213 200212 2 001

Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si.

NIP 19870728 201404 2 001

Program Sarjana

Departemen Matematika

Fakultas Sains dan Analitika Data

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2023



FINAL PROJECT - KM184801

A DYNAMICAL SYSTEM APPROACH TO ANALYZE CRYPTOCURRENCY STABILITY

FELIX LYANTO SETIAWAN

NRP 06111940000041

Supervisors

Endah Rokhmati M.P., Ph.D.

NIP 19761213 200212 2 001

Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si.

NIP 19870728 201404 2 001

Bachelor Program

Departement of Mathematics

Faculty of Scientics

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2023

LEMBAR PENGESAHAN

PENDEKATAN SISTEM DINAMIK UNTUK MENGANALISIS KESTABILAN CRYPTOCURRENCY

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Matematika pada
Program Studi S-1 Matematika
Departemen Matematika
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **FELIX LYANTO SETIAWAN**
NRP. 0611194000041

Surabaya, Juli 2023

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

Pembimbing

1. Endah Rokhmati M.P., Ph.D.
NIP. 19761213 200212 2 001

2. Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si.
NIP. 19870728 201404 2 001

Penguji

1. Drs. Iis Herisman, M.Si.
NIP. 19601002 198903 1 002

2. Sena Safarina, S.Si., M.Sc., D.Sc.
NIP. 1990202012052

3. Muhammad Syifa'ul Mufid, S.Si., M.Si., D.Phil.
NIP. 19890911 201404 1 001

(.....)

(.....)

(.....)

(.....)

(.....)

Mengetahui

Kepala Departemen Matematika
Fakultas Sains dan Analitika Data



Prof. Subhanu, Ph.D.
NIP. 19810513 19702 1 001

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan disini:

Nama Mahasiswa / NRP : Felix Lyanto Setiawan / 06111940000041
Departemen : Matematika
Dosen Pembimbing / NIP : 1. Endah Rokhmati M.P., Ph.D. / 19761213 200212 2 001
2. Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si. / 19870728 201404 2 001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “PENDEKATAN SISTEM DINAMIK UNTUK MENGANALISIS KESTABILAN *CRYPTOCURRENCY*” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 17 Juli 2023

Mengetahui
Dosen Pembimbing 2

Dosen Pembimbing 1

Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si.
NIP. 19870728 201404 2 001

Endah Rokhmati M.P., Ph.D.
NIP. 19761213 200212 2 001

Mahasiswa

Felix Lyanto Setiawan
NRP. 06111940000041

ABSTRAK

PENDEKATAN SISTEM DINAMIK UNTUK MENGANALISIS KESTABILAN *CRYPTOCURRENCY*

Nama Mahasiswa / NRP : Felix Lyanto Setiawan / 06111940000041
Departemen : Matematika FSAD -ITS
Dosen Pembimbing : 1. Endah Rokhmati M.P., Ph.D.
2. Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si.

Abstrak

Mata uang *cryptocurrency* telah menarik perhatian publik karena kenaikan harga 9 kali pada tahun 2017. Kenaikan harga ini tentu saja memikat *trader* bertipe spekulasi untuk membeli *cryptocurrency* karena melihat potensi keuntungan besar. Oleh karena itu, penyebab harga *cryptocurrency* berfluktuasi sedang menjadi misteri bagi *trader*. Terdapat dugaan kuat harga *cryptocurrency* berfluktuasi karena *trader* spekulasi mendominasi pasar *cryptocurrency*. Oleh karena itu, pasar *cryptocurrency* sangat dipengaruhi oleh perilaku *trader* spekulasi. Adapun perilaku *trader* spekulasi yang paling mempengaruhi pasar antara lain: perilaku membeli atau menjual aset mengikuti arah tren dan perilaku *trader* membeli atau menjual aset berdasarkan nilai fundamental. Lebih lanjut, likuiditas pasar *cryptocurrency* juga merupakan faktor lainnya disamping perilaku *trader*. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan perilaku *trader* spekulasi yang paling mempengaruhi fluktuasi harga *cryptocurrency*. Pada tahap awal, penelitian ini mengembangkan model sistem dinamik pasar *cryptocurrency* yang telah dikonstruksi oleh Caginalp dan Balenovich, kemudian dilakukan analisis kestabilan sistem untuk berbagai parameter. Pada tahap kedua, dilakukan analisis kestabilan sistem pasar *cryptocurrency* dengan teorema kestabilan nilai *eigen* dan kondisi *Routh-Hurwitz* untuk mendapatkan himpunan pasangan parameter yang sistem pasar *cryptocurrency* stabil. Pada tahap akhir, dilakukan analisis hasil kestabilan berdasarkan teori ekonomi. Hasil analisis menunjukkan bahwa perilaku *trader* yang menjual atau membeli aset mengikuti arah tren merupakan faktor yang paling mempengaruhi fluktuasi harga *cryptocurrency*.

Kata kunci: *Cryptocurrency, Sistem Dinamik, Spekulasi, Trader, Tren.*

ABSTRACT

A DYNAMICAL SYSTEM APPROACH TO ANALYZE CRYPTOCURRENCY STABILITY

Student Name / NRP : Felix Lyanto Setiawan / 0611194000041
Departement : Mathematics SCIENTICS - ITS
Advisor : 1. Endah Rokhmati M.P., Ph.D.
2. Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si.

Abstract

The cryptocurrency has caught the public's attention due to a 9-fold price increase in 2017. This price increase has certainly enticed speculative-type traders to buy cryptocurrencies because they see the potential for huge profits. Therefore, the cause of cryptocurrency prices fluctuate is a mystery to traders. There is a strong suspicion cryptocurrency prices fluctuate because speculative traders dominate the cryptocurrency market. Therefore, the cryptocurrency market is heavily influenced by the behavior of speculative traders. The speculative trader behaviors that affect the market the most include buying or selling assets following the direction of the trend and the behavior of traders buying or selling assets based on fundamental value. Furthermore, the liquidity of the cryptocurrency market is also another factor besides trader behavior. This study was conducted to find the speculative trader behavior that most influences cryptocurrency price fluctuations. In the first stage, this research develops a dynamic system model of the cryptocurrency market that has been constructed by Caginalp and Balenovich, then analyzes the stability of the system for various parameters. In the second stage, the stability analysis of the cryptocurrency market system is carried out with the eigenvalue stability theorem and the Routh-Hurwitz condition to obtain the set of parameter pairs for which the cryptocurrency market system is stable. In the final stage, the stability results are analyzed based on economic theory. The results of this research showed that the behavior of traders who sell or buy assets following the uptrend or downtrend is the factor that most influences cryptocurrency price fluctuations.

Keywords: *Cryptocurrency, Dynamical System, Risk-taker, Trader, Trend.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT karena atas berkah, rahmat dan Ridho-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul :

”PENDEKATAN SISTEM DINAMIK UNTUK MENGANALISIS KESTABILAN *CRYPTOCURRENCY*”

sebagai salah satu persyaratan akademis dalam menyelesaikan Program Sarjana Departemen Matematika, Fakultas Sains dan Analitika Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik berkat kerja sama, bantuan, dan dukungan dari banyak pihak. Sehubungan dengan hal itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih dan penghargaan kepada :

1. Bapak Prof. Subchan, Ph.D. selaku kepala Departemen Matematika Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
2. Ibu Endah Rokhmah M.P., Ph.D. dan Ibu Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dengan penuh kesabaran kepada penulis.
3. Bapak Prof. Dr. Drs. Chairul Imron, MI.Komp., selaku dosen wali yang telah memberikan arahan akademik dengan penuh kesabaran kepada penulis selama masa perkuliahan.
4. Bapak Yoyon Setiawan dan Ibu Henny Chen, selaku orang tua yang memberikan dukungan baik secara fisik dan moral kepada penulis, sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Saudari Vania Frederica, yang telah memberikan semangat dan afirmasi positif kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Rekan-rekan ASCI HIMATIKA ITS 2021, yang telah memberikan dukungan berupa semangat dan afirmasi positif kepada penulis.
7. Rekan-rekan Magister Matematika ITS 2022, yang telah memberikan dukungan berupa semangat kepada penulis serta kontribusi untuk penelitian ini, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Rekan-rekan GAMMA yang telah memberikan dukungan berupa semangat kepada serta kontribusi untuk penelitian ini, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik dari pembaca. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi semua pihak yang berkepentingan.

Surabaya, 17 Juli 2023

Felix Lyanto Setiawan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i	
PERNYATAAN ORISINALITAS	iii	
ABSTRAK	v	
ABSTRACT	vii	
KATA PENGANTAR	ix	
DAFTAR ISI	xi	
DAFTAR GAMBAR	xiii	
DAFTAR TABEL	xv	
Bab I	PENDAHULUAN	1
1.1	Latar Belakang	1
1.2	Rumusan Masalah	2
1.3	Batasan Masalah	2
1.4	Tujuan	2
1.5	Manfaat	3
Bab II	TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1	Penelitian terdahulu	5
2.2	<i>Cryptocurrency</i>	6
2.3	Mekanisme <i>Trading Cryptocurrency</i>	7
2.4	Pergerakan Harga <i>Cryptocurrency Bitcoin</i>	8
2.5	Nilai Pasar, Nilai Intrinsik, Likuiditas	11
2.6	Persamaan Diferensial Biasa	11
2.7	Masalah Nilai Awal	12
2.8	Sistem Dinamik	12
2.9	Titik Kesetimbangan dan Pelinieran di Sekitar Titik Kesetimbangan	13
2.10	Analisis Kestabilan untuk Sistem Tak Linier	15
2.11	Kriteria <i>Routh-Hurwitz</i>	15
2.12	Teorema Fundamental Kalkulus I dan Aturan integral <i>Leibniz</i>	16
Bab III	METODOLOGI	19
Bab IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	21
4.1	Model Sistem Pasar <i>Cryptocurrency</i>	21
4.1.1	<i>Asset Flow Equations</i>	21
4.1.2	<i>Trend Based Component</i>	23
4.1.3	<i>Perceived Value</i>	24
4.1.4	<i>Value Component</i>	25
4.1.5	<i>Liquidity component</i>	25
4.1.6	Sistem Dinamik Pasar <i>Cryptocurrency</i>	26
4.2	Analisis Kestabilan Sistem Pasar <i>Cryptocurrency</i>	29

4.3	Analisis Kestabilan Sistem Bebas Sentimen	35
4.4	Analisis Kestabilan Sistem Bebas <i>Value Component</i>	39
Bab V	KESIMPULAN DAN SARAN	45
5.1	Kesimpulan	45
5.2	Saran	45
	DAFTAR PUSTAKA	47
	UCAPAN TERIMA KASIH	49
	BIODATA PENULIS	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema pembelian <i>Cryptocurrency</i>	8
Gambar 2.2 Skema penjualan <i>Cryptocurrency</i>	8
Gambar 4.1 Stabilitas Sistem (4.44) di bidang $K - q_2$ untuk nilai c_3 dan τ_0 yang berbeda. Daerah yang berwarna biru menunjukkan himpunan pasangan nilai (K, q_2) yang membuat Sistem (4.62) stabil <i>asimptotik</i> yang berakibat Sistem (4.44) stabil <i>asimptotik</i>	34
Gambar 4.2 Stabilitas Sistem (4.71) yang merupakan Sistem (4.44) yang disederhanakan dengan mengasumsikan bahwa tidak terdapat sentimen dan nilai fundamental didalam pasar <i>cryptocurrency</i> . Sistem (4.71) stabil <i>asimptotik</i> untuk himpunan pasangan nilai $(\frac{c}{\tau_0}, q)$ didalam daerah berwarna biru.	37
Gambar 4.3 Kurva solusi Sistem (4.71) untuk nilai $c = \tau_0 = q = 1$ dengan berbagai kondisi awal.	37
Gambar 4.4 Kurva solusi Sistem (4.71) untuk nilai $c = \tau_0 = 0.5, q = 2$ dengan berbagai kondisi awal.	38
Gambar 4.5 Kurva solusi Sistem (4.71) untuk nilai $c = \tau_0 = 0.5, q = 4$ dengan berbagai kondisi awal.	38
Gambar 4.6 Kurva solusi Sistem (4.81) untuk nilai $c = \tau_0 = q = 1, q_1 = 0.25$ dengan berbagai kondisi awal.	41
Gambar 4.7 Kurva solusi Sistem (4.81) untuk nilai $c = \tau_0 = q, q_1 = 0.5$ dengan berbagai kondisi awal.	42
Gambar 4.8 Kurva solusi Sistem (4.81) untuk nilai $c = \tau_0 = q = q_1 = 1$ dengan berbagai kondisi awal.	43

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Dua kasus ketidakseimbangan permintaan dan penawaran akibat <i>excess demand</i>	5
Tabel 2.2	Harga <i>Bitcoin</i> pada periode 2009-2011.	9
Tabel 2.3	Harga <i>Bitcoin</i> pada periode 2012-2015.	9
Tabel 2.4	Harga <i>Bitcoin</i> pada periode 2016-2019.	10
Tabel 2.5	Harga <i>Bitcoin</i> pada periode 2020-2022.	10
Tabel 2.6	Tabel <i>Routh-Hurwitz</i>	15
Tabel 4.1	Tabel <i>Routh-Hurwitz</i> Persamaan (4.66).	33
Tabel 4.2	Tabel <i>Routh-Hurwitz</i> Persamaan (4.78).	36

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada era digital ini, telah tercipta beragam aset-aset dasar dalam investasi yang mampu memberikan keuntungan. Adapun aset-aset dasar investasi yang telah dikenal saat ini antara lain: saham perusahaan, obligasi, mata uang, emas, dan masih banyak lagi. Akan tetapi, aset dasar yang menjadi isu hangat para investor adalah *cryptocurrency* modern. *Cryptocurrency* modern merupakan mata uang digital yang diperkenalkan pada Tahun 2009 dengan nama *Bitcoin*. *Bitcoin* diciptakan oleh Satoshi Nakamoto (Nakamoto, 2009) yang telah mengembangkan ide transaksi *peer to peer* murni tanpa ada pihak ketiga dengan memanfaatkan teknologi *blockchain*.

Aset dasar *cryptocurrency* saat ini menjadi pusat perhatian publik karena kenaikan fantastis dalam waktu yang relatif singkat pada tahun 2017. Pada 1 Mei 2017 harga penutupan per koin *Bitcoin* \$1.421,60, tujuh bulan kemudian pada 17 Desember 2017 harga penutupan per koin naik menjadi \$19.140,80 (CoinMarketCap, 2017). Kenaikan harga ini tentu memikat para *trader* bertipe spekulasi untuk membeli *Bitcoin* karena mereka melihat potensi keuntungan di dalamnya. Oleh karena itu, *cryptocurrency* yang awalnya merupakan suatu mata uang digital saat ini telah menjadi suatu aset dasar investasi. Berubahnya *cryptocurrency* dari mata uang digital menjadi kelas aset dasar investasi, membuat jumlah transaksi *cryptocurrency* melompat jauh. Sebelum bulan Desember 2017, *market cap* dari *Bitcoin* tidak melebihi \$100 juta, saat kenaikan harga Desember 2017 *market cap Bitcoin* naik menjadi \$237 juta (Best, 2022). Pada puncaknya *market cap Bitcoin* mencapai rekor tertingginya pada Oktober 2021 yakni \$1,156 triliun (Best, 2022).

Saat ini, hal yang dipertanyakan para *trader* mengenai *cryptocurrency* adalah penyebab harga aset ini sangat fluktuatif. Harga aset yang sangat fluktuatif yang tidak diketahui penyebabnya mempersulit *trader* untuk menentukan keputusan *trading*. Keputusan *trading* meliputi: aset yang dipreferensikan untuk dibeli atau tidak dibeli, momen yang tepat untuk membeli aset dan menjual aset. Oleh karena itu, penyebab harga *cryptocurrency* yang sangat fluktuatif merupakan suatu informasi yang sangat penting bagi *trader*.

Adapun dugaan kuat penyebab harga *cryptocurrency* berfluktuasi akibat *trader* spekulasi yang mendominasi pasar. Terdapat dua perilaku *trader* spekulasi yang secara langsung mempengaruhi pasar *cryptocurrency*. Pertama, faktor kecenderungan para *trader* membeli atau menjual *cryptocurrency* mengikuti arah tren harga aset (*trend-based component*), artinya *trader* mengambil posisi *long* saat harga naik dan posisi *short* saat harga turun. Kedua, faktor kecenderungan *trader* melihat nilai fundamental *cryptocurrency* (*value component*), artinya *trader* akan mengambil posisi *short* saat harga *overvalued* dan mengambil posisi *long* saat harga *undervalued*. Selain perilaku *trader* spekulasi, terdapat dugaan bahwa faktor likuiditas dari pasar *cryptocurrency* mempengaruhi harga aset. Likuiditas berpengaruh pada harga karena jika likuiditas pasar rendah dan terjadi pembelian *cryptocurrency* dalam jumlah yang signifikan maka mengakibatkan fluktuasi harga *cryptocurrency* menjadi tinggi.

Penelitian yang dilakukan oleh (C. Caginalp, 2019) telah mengkonstruksi sistem dinamik pasar *cryptocurrency* untuk melakukan analisis kestabilan harga *cryptocurrency* dan menentukan faktor yang paling mempengaruhi fluktuasi harga *cryptocurrency*. Penelitian tersebut

menghasilkan kesimpulan bahwa perilaku *trader* yang cenderung membeli aset mengikuti arah tren harga aset (*trend-based component*) merupakan penyebab utama fluktuasi harga aset. Pada penelitian tugas akhir ini akan dilakukan konstruksi model sistem pasar *cryptocurrency* dan analisis kestabilan harga *cryptocurrency* untuk memverifikasi hasil penelitian yang telah dilakukan oleh (C. Caginalp, 2019).

Berikut merupakan tahapan-tahapan dalam penelitian tugas akhir ini. Pertama, menyusun model sistem dinamik pasar *cryptocurrency* yang terdiri dari *Asset Flow Equations* serta definisi dari tiga faktor yang mempengaruhi kestabilan harga *cryptocurrency*. Kedua, dilakukan analisis kestabilan sistem pasar *cryptocurrency* menggunakan teorema kestabilan nilai *eigen* sistem tak linier dan kriteria *Routh-Hurwitz*. Analisis kestabilan pertama akan dicari kondisi di mana sistem pasar *cryptocurrency* stabil. Analisis kestabilan kedua akan didapatkan kondisi di mana sistem pasar *cryptocurrency* stabil dengan mengasumsikan sistem bebas *perceived value* dan sentimen. Analisis kestabilan ketiga akan didapatkan kondisi di mana sistem pasar *cryptocurrency* stabil dengan mengasumsikan sistem bebas *value component* dan *perceived value*. Ketiga, akan dilakukan analisis parameter-parameter terkait dengan sistem pasar *cryptocurrency*, yang membuat sistem pasar menjadi stabil.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana dinamika harga aset *cryptocurrency* dimodelkan dengan pendekatan sistem dinamik?
2. Apa faktor yang paling mempengaruhi fluktuasi harga aset *cryptocurrency*?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang diberikan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini memfokuskan dinamika harga *cryptocurrency* terkenal seperti *Bitcoin*, *Ethereum*, *Dogecoin*.
2. Penelitian ini meninjau *cryptocurrency* sebagai aset dasar yang proses pembelian dan penjualannya serupa dengan saham.
3. Penelitian ini tidak mempertimbangkan faktor-faktor eksternal seperti kebijakan pemerintah, perubahan regulasi, dan lain-lainnya.
4. Sistem pasar *cryptocurrency* diasumsikan tanpa *arbitrage*.
5. Penelitian ini mengasumsikan perubahan harga *cryptocurrency* terjadi akibat adanya *excess demand* (kelebihan permintaan).

1.4 Tujuan

Tujuan yang akan dicapai dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mengembangkan dan menganalisis kestabilan model sistem dinamik pasar *cryptocurrency*.
2. Mengidentifikasi faktor yang paling mempengaruhi stabilitas harga *cryptocurrency* di antara *trend-based component*, *value-component* dan likuiditas pasar berdasarkan hasil analisis kestabilan.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan pemahaman yang lebih baik tentang faktor faktor yang mempengaruhi stabilitas *cryptocurrency*.
2. Menyediakan informasi yang berguna bagi para *investor* dan pelaku pasar *cryptocurrency* dalam mengelola resiko investasi.
3. Menyediakan metode yang dapat digunakan untuk mengevaluasi tingkat stabilitas dari harga *cryptocurrency*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian terdahulu

Diberikan suatu model diskrit *excess demand* untuk menghitung perubahan harga suatu aset apabila diketahui permintaan dan penawaran. Model matematika dikonstruksikan menurut teori ekonomi klasik yang menyatakan bahwa *excess demand* (atau selisih antara permintaan dan penawaran) $d_{i-1} - s_{i-1}$ berbanding lurus dengan perubahan harga $p_i - p_{i-1}$ (C. Caginalp & Caginalp, 2020) didefinisikan sebagai berikut :

$$p_i - p_{i-1} = \frac{1}{\tau_0}(d_{i-1} - s_{i-1}). \quad (2.1)$$

Adapun $i = 0, 1, 2, \dots, n$ merupakan waktu diskrit, p_i adalah harga aset pada saat waktu ke- i , d_{i-1}, s_{i-1} masing masing menyatakan permintaan dan penawaran pada waktu ke $i - 1$. Kemudian, $\frac{1}{\tau_0}$ merupakan *rate* yang menunjukkan seberapa cepat perubahan harga meningkat per unit *excess demand*. Apabila nilai τ_0 semakin besar maka semakin kecil perubahan harga yang terjadi akibat *excess demand*. Apabila nilai τ_0 semakin kecil maka semakin besar perubahan harga terjadi akibat *excess demand*.

Persamaan (2.1) merupakan persamaan yang berlaku untuk pasangan penawaran dan permintaan linier. Misalkan, sebuah ketidakseimbangan pasar yang disebabkan oleh adanya *excess demand* sebagai berikut :

Tabel 2.1 Dua kasus ketidakseimbangan permintaan dan penawaran akibat *excess demand*.

Kasus 1	Kasus 2
$d_{t-1} = 40$	$d_{t-1} = 10020$
$s_{t-1} = 20$	$s_{t-1} = 10000$

Misalkan bahwa $\tau_0 = 0.1$, maka pada Kasus 1 diperoleh perubahan harga sebesar $\frac{1}{0.1}(40 - 20) = 200$ satuan uang. Sedangkan, untuk Kasus 2 diperoleh perubahan harga relatif $\frac{1}{0.1}(10020 - 10000) = 200$ satuan uang. Kedua hasil ini menunjukkan apabila terjadi kelebihan permintaan sebanyak 20 unit *cryptocurrency* maka harga akan naik sebesar 200 satuan uang. Tampak bahwa perubahan harga untuk Kasus 1 dan Kasus 2 adalah sama. Padahal, ketidakseimbangan permintaan dan penawaran yang terjadi pada Kasus 1 jauh lebih signifikan daripada ketidakseimbangan yang terjadi pada Kasus 2. Hal ini disebabkan karena kelebihan permintaan pada Kasus 1 mencapai 50% penawaran, sedangkan kelebihan permintaan pada Kasus 2 hanya 2% penawaran.

Untuk menghindari kesamaan hasil seperti yang ditunjukkan pada kasus di atas, diperlukan normalisasi. Normalisasi dilakukan dengan cara membagi ruas kanan dari Persamaan (2.1) dengan s_{i-1} dan membagi ruas kiri dengan p_{i-1} . Didapatkan Persamaan (2.1) yang telah dinormalisasi sebagai berikut :

$$\frac{p_i - p_{i-1}}{p_{i-1}} = \frac{1}{\tau_0} \frac{d_{i-1} - s_{i-1}}{s_{i-1}}. \quad (2.2)$$

Normalisasi ini mengarah pada persamaan yang masuk akal karena kelebihan permintaan pada Persamaan (2.2) diasumsikan kelebihan permintaan relatif penawaran dan perubahan harga aset diasumsikan perubahan harga relatif. Oleh karena itu, tidak ada persyaratan yang memaksa bahwa perubahan harga harus merupakan fungsi linier dari kelebihan permintaan seperti yang ditunjukkan pada (2.1). Secara umum, perubahan harga relatif dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\frac{P_i - P_{i-1}}{P_{i-1}} = g(d_{i-1}, s_{i-1}), \quad (2.3)$$

dengan $g(d_{i-1}, s_{i-1})$ merupakan fungsi d_{i-1} dan s_{i-1} .

2.2 Cryptocurrency

Cryptocurrency adalah suatu bentuk baru dari mata uang digital yang dapat digunakan transaksi layaknya mata uang asli untuk membeli barang atau jasa. Lebih lanjut, cara kerja *cryptocurrency* tidak sama persis seperti mata uang asli, karena metode transfer *cryptocurrency* tidak memerlukan perantara bank (Danial, 2019). Ide transaksi yang tidak memerlukan perantara bank pada *cryptocurrency* pertama kali diciptakan oleh Satoshi Nakamoto yang disebut *Bitcoin*. Secara khusus, Satoshi merilis ide *Bitcoin* pada tahun 2009 dalam penelitiannya yang berjudul "Transaksi *Peer to Peer* Murni dari Uang Elektronik" (Nakamoto, 2009).

Adapun sistem transaksi pada *cryptocurrency* didasari oleh teknologi *blockchain*. *Blockchain* merupakan suatu cara untuk menyimpan data (dapat diartikan sebagai jumlah *cryptocurrency* yang dimiliki) secara digital yang saling terkoneksi satu perangkat dengan perangkat lainnya. Data-data yang telah disimpan dengan teknologi *blockchain* ini bersifat desentralisasi artinya tidak dimiliki oleh entitas manapun. Oleh karena itu, semua komputer yang terhubung dapat melacak transaksi dari *cryptocurrency* (Danial, 2019). Berikut merupakan mekanisme transaksi pada *cryptocurrency* yang menggunakan teknologi *blockchain* (Lieure, 2018) :

1. transaksi dimulai apabila terdapat pengajuan transaksi oleh pengguna,
2. informasi mengenai transaksi yang diajukan disebarkan melalui jaringan *peer to peer* yang terdiri dari banyak komputer. Di dalam jaringan tersebut terjadi proses verifikasi dan validasi transaksi. Tahap ini digunakan untuk menghindari transaksi berganda (*double-spending*) atau kecurangan,
3. setelah tervalidasi, transaksi *cryptocurrency* yang terverifikasi akan disimpan dalam suatu blok,
4. setelah dilakukan verifikasi, blok data disimpan ke *blockchain* bersama blok data transaksi-transaksi lainnya sehingga dapat dipastikan semua data-data setiap transaksi tersimpan permanen dan tidak dapat digantikan,
5. transaksi berhasil dilakukan,

Aset *cryptocurrency* yang didasari oleh teknologi *blockchain*, memberikan banyak keunggulan bagi para penggunanya apabila digunakan sebagai mata yang layaknya uang negara. Keunggulan pertama, pengiriman aset *cryptocurrency* tidak dikenakan biaya admin karena aset *cryptocurrency* tidak memerlukan perantara seperti bank. Kedua, memberikan kendali penuh pengguna terhadap dana yang dimiliki tanpa ada resiko pembekuan dana oleh negara akibat krisis ekonomi. Ketiga, aset *cryptocurrency* bebas inflasi karena jumlah aset *cryptocurrency* pada umumnya dibatasi jumlah atau *rate* produksinya, seperti *cryptocurrency bitcoin* yang akan berhenti diproduksi apabila jumlahnya mencapai 21 juta koin.

Aset *cryptocurrency* juga memiliki kelemahan yang membuat aset tersebut tidak bisa dijadikan mata uang sehari-hari. Pertama, harga aset yang sangat fluktuatif, sehingga jika aset *cryptocurrency* dijadikan mata uang negara maka akan sulit melakukan penetapan tarif sebuah barang atau jasa. Seperti kejadian yang disampaikan oleh (Danial, 2019), pada tahun 2017 *bitcoin* meningkat tajam hingga 1000% kemudian ”terjun” bebas. Kedua, menurut (Danial, 2019) aset *cryptocurrency* memiliki regulasi yang minimal.

Di Indonesia aset *cryptocurrency* merupakan suatu aset dasar investasi resmi dengan dasar hukum Peraturan Menteri Perdagangan Republik Indonesia Nomor 99 Tahun 2018. Adapun cara membeli *cryptocurrency* adalah melalui sekuritas *cryptocurrency* resmi BAPPEPBTI. Berikut merupakan daftar sekuritas resmi *cryptocurrency* :

1. PT. *Indodax* Nasional Indonesia (merek : *Indodax*),
2. PT. *Crypto* Indonesia Berkat (merek : *tokocrypto*),
3. PT. *Zipmex Exchange* Indonesia (merek : *zipmex*),
4. PT. Indonesia Digital *Exchange* (merek : *Idex*),

dan sebagainya, total terdapat 11 sekuritas *cryptocurrency* resmi BAPPEPTI. Saat ini pasar *cryptocurrency* telah menguasai pasar dunia dengan jumlah *market cap* dunia sebesar \$1.127.869.352.950,652 per Juli 2022, berdasarkan informasi coinmarketcap.com.

2.3 Mekanisme Trading Cryptocurrency

Pada penelitian ini, *cryptocurrency* diasumsikan sebagai instrumen investasi yang diperdagangkan seperti saham. Terdapat dua belah pihak dalam *trading Cryptocurrency* yakni *trader* dan penjual (*exchanger*). Adapun proses transaksi secara umum dalam *trading cryptocurrency* adalah sebagai berikut :

1. *trader* melakukan deposit sejumlah uang ke dalam akun sekuritas *exchanger* dengan melakukan sejumlah prosedur pembayaran yang dibuat oleh pihak *exchanger*,
2. setelah dilakukan prosedur pembayaran deposit, maka saldo akun *trader* akan terisi sejumlah uang sesuai dengan yang telah didepositkan pembeli aset. Saldo akun diasumsikan sebagai uang yang dapat dibelanjakan *cryptocurrency*,
3. setiap pembelian *cryptocurrency* akan mengurangi saldo akun, sedangkan setiap penjualan *cryptocurrency* akan menambahkan saldo akun,
4. selain dapat melakukan deposit ke dalam akun *exchanger*, *trader* dapat menarik (*withdraw*) saldo akun.

Berikut merupakan skema *trading cryptocurrency* yang melibatkan penjual (*exchanger*) dan *trader*



Gambar 2.1 Skema pembelian *Cryptocurrency*.

Trader akan membeli sejumlah *cryptocurrency* dengan harga pada waktu t menggunakan saldo akun. Kemudian, penjual akan menarik saldo akun *trader* sebanyak nominal harga *cryptocurrency* yang dibeli dan mengirimkan *cryptocurrency* ke *trader*. Apabila *trader* ingin menjual *cryptocurrency* berikut merupakan skema penjualan *Cryptocurrency*



Gambar 2.2 Skema penjualan *Cryptocurrency*.

Trader akan menjual sejumlah *cryptocurrency* dengan harga pada waktu t . Kemudian, penjual akan menerima *cryptocurrency* dan menambahkan saldo akun *trader* sebanyak nominal harga *cryptocurrency* yang dijual.

2.4 Pergerakan Harga *Cryptocurrency Bitcoin*

Pada saat pertama kali diciptakan pada tahun 2009 *Bitcoin* berada pada posisi harga \$0, kemudian pada 17 Juli 2010 harga *Bitcoin* naik menjadi \$0,09. Adapun kenaikan signifikan harga *Bitcoin* terjadi selama tiga bulan yakni pada tanggal 13 April 2011 hingga Juni 2011, harga *Bitcoin* \$1 menjadi \$29,60. Setelah mengalami kenaikan dari Juni 2011, terjadi resesi pada pa-

sar *cryptocurrency* menyebabkan harga *Bitcoin* jatuh menjadi \$2,05 di pertengahan Nopember 2011.

Tabel 2.2 Harga *Bitcoin* pada periode 2009-2011.

Waktu Tercatat	Harga
Awal Penciptaan 2009	\$0
17 Juli 2010	\$0,09
13 April 2011	\$1
Juni 2011	\$29,60
Nopember 2011	\$2,05

Di tahun berikutnya terjadi kenaikan kembali, dari 9 Mei 2012 hingga 15 Agustus 2012 harga *Bitcoin* naik dari \$4,85 menjadi \$13,50. Secara umum dapat disimpulkan tahun 2012 merupakan tahun yang cukup baik bagi harga *Bitcoin*, namun pada tahun 2013 mulai terjadi kenaikan tajam harga *Bitcoin*. Harga *Bitcoin* pada 2 Januari 2013 adalah \$13,28 dan mencapai harga \$230 pada April 2013. Setelah terjadi lompatan harga, terjadi penurunan harga *Bitcoin* menjadi \$68,50 pada 4 Juli 2013. Kemudian, pada awal Oktober 2013, harga pasar *Bitcoin* sudah mencapai \$123,00. Pada 5 Desember 2013 harga *Bitcoin* mencapai \$1.152,73 namun tiga hari kemudian setelah harga ini diamati, diketahui harga *Bitcoin* turun menjadi \$697,31. Kemudian harga *Bitcoin* menyentuh \$314,85 pada 3 Januari 2015.

Tabel 2.3 Harga *Bitcoin* pada periode 2012-2015.

Waktu Tercatat	Harga
9 Mei 2012	\$4,85
12 Agustus 2012	\$13,50
2 Januari 2013	\$13,28
9 April 2013	\$230
4 Juli 2013	\$68,50
Oktober 2013	\$123,00
5 Desember 2013	\$1.152,73
8 Desember 2013	\$697,31
3 Januari 2015	\$314,85

Pada 2016, harga *Bitcoin* cenderung naik secara perlahan hingga mencapai \$963,4 pada 31 Desember 2016. Kemudian, pada tahun 2017 harga *Bitcoin* berada di sekitar \$1.000 hingga menembus \$2040.2 pada 20 Mei 2017, kemudian meroket menjadi \$19.345,49 pada 16 Desember 2017. Meroketnya harga *Bitcoin* pada tahun 2017 menarik perhatian para investor, pemerintah, ekonom, ilmuwan, dan entitas lain untuk membuat *cryptocurrency* lain untuk bersaing dengan *Bitcoin*.

Pada tahun 2018 dan 2019 harga *Bitcoin* cenderung mendatar dengan sedikit pergerakan pada harga. Adapun kenaikan harga pada Juni 2019, pada tanggal 1 Juni 2019 harga *Bitcoin* berada pada posisi \$8.545,7, namun pada 21 Juni 2019 harga mencapai \$10.179.3. Setelah terjadi kenaikan pada Juni 2019, terjadi penurunan harga *Bitcoin* hingga mencapai \$6613,3 pada 17 Desember 2019.

Tabel 2.4 Harga *Bitcoin* pada periode 2016-2019.

Waktu Tercatat	Harga
31 Desember 2016	\$963,4
20 Mei 2017	\$2040,2
16 Desember 2017	\$19.345,49
1 Juni 2019	\$8.545,7
21 Juni 2019	\$10.179,3
17 Desember 2019	\$6.613,3

Pada tahun 2020, saat ekonomi sedang terpuruk karena adanya pandemi *COVID-19*. Harga *Bitcoin* kembali naik hingga \$7.199,8 pada 1 Januari 2020. Keterpurukan ekonomi akibat pandemi membuat orang-orang cenderung memindahkan uang mereka menjadi *Bitcoin*. Akibatnya, terjadi permintaan berlebih pada *Bitcoin* sehingga menyebabkan harga meningkat tajam. Adapun kenaikan pada akhir 2020, terjadi pada tanggal 1 Desember 2020 terpantau harga *Bitcoin* mencapai \$18.770,7, naik menjadi \$28.949,4 pada 31 Desember 2020.

Tabel 2.5 Harga *Bitcoin* pada periode 2020-2022.

Waktu Tercatat	Harga
1 Januari 2020	\$7.199,8
1 Desember 2020	\$18.770,7
31 Desember 2020	\$28.949,4
8 Januari 2021	\$40.599,3
13 April 2021	\$63.518
1 Juli 2021	\$33.554,4
20 Juli 2021	\$29.806,1
1 September 2021	\$48.844
6 September 2021	\$52.676
21 September 2021	\$40.664
10 Nopember 2021	\$68.925
31 Desember 2021	\$46.218
1 Januari 2022	\$47.755
31 Januari 2022	\$38.526
28 Agustus 2022	\$19.557,8
31 Desember 2022	\$16.564

Pada awal 2021 *Bitcoin* telah memecahkan rekor harga tertinggi 2020. Pada 8 Januari 2021 harga *Bitcoin* mencapai \$40.599,3. Kemudian pada April 2021 *Bitcoin* memecahkan rekor harga Januari 2021, harga *Bitcoin* saat itu telah mencapai lebih dari \$60.000 kenaikan harga ini terjadi saat penukaran *cryptocurrency* telah *go-public*. Harga terus naik hingga 13 April 2021 yang terpantau harga *Bitcoin* telah mencapai puncak yakni \$63.518.

Pada musim panas 2021, harga pada Juli 2021 cenderung menurun, terpantau 1 Juli 2021 harga *Bitcoin* mencapai \$33.554,4, kemudian turun menjadi \$29.806,1 pada 20 Juli 2021. Kemudian, pada bulan September 2021 harga cenderung naik, terpantau pada tanggal pada 1 September 2021 harga *Bitcoin* mencapai \$48.844 naik menjadi \$52.676 pada 6 September 2021. Selanjutnya, terjadi penurunan 2 minggu setelahnya menjadi \$40.664. Pada 10 Nopember 2021,

Bitcoin telah kembali memecahkan rekor yakni mencapai \$68.925. Kemudian pada Desember 2021 harga cenderung menurun hingga mencapai \$46.218 pada 31 Desember 2021. Harga *Bitcoin* lebih berfluktuasi pada tahun 2021 karena ketidakpastian inflasi dan munculnya varian baru *COVID-19*.

Pada Januari 2022, terpantau harga *Bitcoin* mencapai \$47.755 pada 1 Januari 2022, kemudian menurun hingga \$38.526 pada 31 Januari 2022. Kemudian, pada 28 Agustus 2022 harga turun hingga mencapai \$19.557,8. Penurunan harga pada bulan Agustus 2022 merupakan penurunan harga paling signifikan sejak 2021, di mana harga *Bitcoin* di bawah \$20.000. Setelah Agustus 2022, harga cenderung menurun dan tidak ada kenaikan yang signifikan hingga pada 31 Desember 2022 harga *Bitcoin* mencapai \$16.564. Adapun data pergerakan harga *Bitcoin* merupakan harga *Bitcoin* yang dijual oleh *exchanger Bitfinex*. Data pergerakan ini diambil dari www.investing.com.

2.5 Nilai Pasar, Nilai Intrinsik, Likuiditas

Nilai pasar merupakan harga saham yang terjadi di pasar bursa pada saat tertentu. Oleh karena itu nilai pasar ini ditentukan oleh permintaan dan penawaran saham yang bersangkutan di pasar bursa (Lutfiana, Danial, & Jhoansyah, 2019). Nilai intrinsik disebut juga dengan nilai fundamental, secara umum merupakan harga sebenarnya dari saham, berdasarkan faktor internal perusahaan seperti keuangan, pendapatan dan besar perusahaan (Lutfiana et al., 2019). Nilai intrinsik sendiri berbeda dengan nilai pasar (harga saham) (Alula, 2022). Adapun fungsi dari nilai intrinsik adalah untuk menentukan keputusan *trading*, jika harga pasar lebih besar daripada nilai intrinsik maka *trader* akan cenderung menjual saham. Sebaliknya, jika nilai intrinsik lebih besar daripada harga pasar maka *trader* akan cenderung membeli saham.

Likuiditas merupakan kemampuan seberapa cepat *cryptocurrency* dapat dibeli atau dijual tanpa mempengaruhi harga *cryptocurrency* secara signifikan (SEC, 2008). Likuiditas secara umum diukur menggunakan *current ratio* yang diformulasikan sebagai berikut :

$$\text{Current Ratio} = \frac{\text{Jumlah aset}}{\text{Jumlah liabilitas}}$$

Pada penelitian ini jumlah aset diasumsikan sebagai jumlah uang di dalam sistem pasar *cryptocurrency*. Sedangkan, jumlah liabilitas pada penelitian ini diasumsikan sebagai jumlah *cryptocurrency* yang ada di dalam sistem pasar *cryptocurrency*.

2.6 Persamaan Diferensial Biasa

Persamaan Diferensial adalah suatu persamaan yang memuat satu atau lebih turunan dari suatu fungsi yang tidak diketahui. Berikut merupakan contoh dari Persamaan Diferensial :

$$\frac{dy}{dx} + y = x^2 \quad (2.4)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -k^2y \quad (2.5)$$

$$\frac{d^3y}{dx^3} + \left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)^5 + \cos x = 0 \quad (2.6)$$

$$\sin\left(\frac{dy}{dx}\right) + \tan^{-1}y = 1 \quad (2.7)$$

$$\phi_{xx} + \phi_{yy} - \phi_x = e^x + x \sin y \quad (2.8)$$

Persamaan Diferensial (2.4), (2.5), (2.6), (2.7) dinamakan Persamaan Diferensial Biasa. Pada Persamaan (2.8) fungsi $\phi(x, y)$ bergantung pada lebih dari satu variabel yakni x dan y . Persamaan Diferensial seperti itu disebut Persamaan Diferensial Parsial.

Tingkat tertinggi dari turunan fungsi di dalam Persamaan Diferensial disebut orde dari Persamaan Diferensial berdasarkan contoh persamaan diberikan yang diberikan, persamaan (2.4) adalah Persamaan Diferensial Biasa orde-1, (2.5) merupakan Persamaan Diferensial orde-2, (2.6) merupakan Persamaan Diferensial Biasa orde-3, (2.7) merupakan Persamaan Diferensial Biasa orde-1.

Setiap Persamaan Diferensial Biasa orde- n dengan $n \in \mathbb{N}$ dapat ditulis dengan bentuk

$$G(x, y, y', \dots, y^{(n)}) = 0 \quad (2.9)$$

dengan $y^{(n)}$ menyatakan turunan ke- n dari y terhadap x (bukan y pangkat n). Secara umum, Persamaan Diferensial yang akan dibahas pada penelitian ini adalah Persamaan Diferensial Biasa yang Tak Linier (Goode, 2000).

Selanjutnya berdasarkan (Boyce & Diprima, 2009), bentuk umum dari Persamaan Diferensial Biasa yang Linier didefinisikan sebagai berikut :

$$a_0(x)y^{(n)} + a_1y^{(n-1)} + \dots + a_ny = F(x) \quad (2.10)$$

di mana a_0, a_1, \dots, a_n dan F adalah fungsi x , merupakan Persamaan Persamaan Diferensial Biasa orde- n Linier. Adapun contoh dari Persamaan Diferensial Biasa yang Linier seperti pada (2.4) dan (2.5).

Adapun definisi Persamaan Diferensial Tak Linier Menurut (Ross, 1984), bentuk umum dari Persamaan Diferensial Tak Linier adalah sebagai berikut. Persamaan Diferensial Biasa yang tak linier merupakan Persamaan Diferensial Biasa yang tidak memenuhi (2.10). Adapun contoh dari Persamaan Diferensial Biasa yang linier seperti pada (2.6) dan (2.7).

2.7 Masalah Nilai Awal

Seperti yang didiskusikan pada bab sebelumnya, Persamaan Diferensial Biasa memiliki solusi umum yakni solusi yang memuat konstanta sebarang. Persamaan Diferensial yang merupakan suatu model matematika, maka penyelesaian dari model harus tunggal atau unik sehingga penyelesaian Persamaan Diferensial harus sesuai $y(x)$ harus sesuai dengan kondisi yang diberikan misalkan $y(x_0) = y_0, y'(x_0) = y_1, \dots, y^{(n)}(x_0) = y_{n-1}$.

Berikut merupakan definisi formal dari masalah nilai awal dari Persamaan Diferensial Biasa tingkat- n (Goode, 2000). Suatu Persamaan Diferensial tingkat- n dengan n kondisi yang diberikan

$$y(x_0) = y_0, y'(x_0) = y_1, \dots, y^{(n)}(x_0) = y_{n-1}$$

di mana y_0, y_1, \dots, y_{n-1} adalah konstanta, disebut masalah nilai awal.

2.8 Sistem Dinamik

Sistem dinamik merupakan suatu sistem yang dapat diketahui nilainya di masa yang akan datang jika diberikan suatu kondisi pada masa sekarang atau masa yang lalu dan kondisi kondisi itu hanya berlaku dalam selang waktu tertentu. Jika t kontinu, bentuk sistem dinamik dinyatakan sebagai sistem Persamaan Diferensial (Nagle, Saff, & Snider, 2018).

Sistem dinamik merupakan suatu sistem Persamaan Diferensial yang dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(t, x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)), i = 1, 2, 3, \dots, n$$

dengan n variabel keadaan dan f_i adalah fungsi bernilai riil dan bergantung secara eksplisit terhadap t . Apabila f_i tidak bergantung secara eksplisit terhadap t , maka sistem dinamik tersebut merupakan sistem *autonomous* yang didefinisikan sebagai berikut :

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)), i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (2.11)$$

Terdapat dua jenis sistem *autonomous*, yaitu sistem *autonomous* linier dan tak-linier. Untuk penelitian ini, sistem yang akan digunakan adalah sistem *autonomous* tak-linier (Nagle et al., 2018).

2.9 Titik Kesetimbangan dan Pelinieran di Sekitar Titik Kesetimbangan

Pandang sistem *autonomous* yakni Sistem (2.11). Sebuah titik $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*)$ merupakan titik kesetimbangan dari Sistem (2.11) jika memenuhi

$$f_i(\mathbf{x}^*) = 0. \quad (2.12)$$

Karena turunan suatu konstanta sama dengan nol, maka fungsi-fungsi konstan

$$\begin{aligned} x_1(t) &= x_1^* \\ x_2(t) &= x_2^* \\ &\vdots \\ x_n(t) &= x_n^* \end{aligned}$$

adalah penyelesaian kesetimbangan dari Sistem (2.11) untuk semua t (Jordan & Smith, 2012).

Apabila Sistem (2.11) merupakan sistem tak-linier, maka akan dilakukan pelinieran Sistem (2.11). Pelinieran dilakukan agar didapatkan sistem linier di sekitar titik kesetimbangan, sehingga teorema kestabilan nilai *eigen* dapat diterapkan. Berikut merupakan penderetan Sistem (2.11),

$$f_i(\mathbf{x}) = f_i(\mathbf{x}^*) + \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \right|_{\mathbf{x}^*} (x_1 - x_1^*) + \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_2} \right|_{\mathbf{x}^*} (x_2 - x_2^*) + \dots + \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \right|_{\mathbf{x}^*} (x_n - x_n^*) + \eta_i(x_1, \dots, x_n) \quad (2.13)$$

dengan $i = 1, 2, \dots, n$, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ dan $\eta_i(x_1, \dots, x_n)$ adalah suku yang dapat diabaikan dengan syarat

1. Konstanta $\left. \frac{\partial f_i}{\partial x_i} \right|_{\mathbf{x}^*}$, $i = 1, 2, \dots, n$ bernilai real dan

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_3}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_4}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{vmatrix} \neq 0 \quad (2.14)$$

2. Suku sisa $\eta_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ memiliki turunan parsial pertama kontinu untuk setiap

(x_1, x_2, \dots, x_n) , dan

$$\lim_{(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)} \frac{\eta_i(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\sqrt{(x_1 - x_1^*)^2 + (x_2 - x_2^*)^2 + \dots + (x_n - x_n^*)^2}} = 0, i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.15)$$

Kemudian, mengingat

$$\frac{d(x_i - x_i^*)}{dt} = \frac{dx_i}{dt} - \frac{dx_i^*}{dt} = \frac{dx_i}{dt}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2.16)$$

Sistem (2.13) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 - x_1^* \\ x_2 - x_2^* \\ x_3 - x_3^* \\ x_4 - x_4^* \\ \vdots \\ x_n - x_n^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{x}^*) \\ f_2(\mathbf{x}^*) \\ f_3(\mathbf{x}^*) \\ f_4(\mathbf{x}^*) \\ \vdots \\ f_n(\mathbf{x}^*) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_3}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_4}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}^*=(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)} \cdot \begin{bmatrix} x_1 - x_1^* \\ x_2 - x_2^* \\ x_3 - x_3^* \\ x_4 - x_4^* \\ \vdots \\ x_n - x_n^* \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

Mengingat bahwa \mathbf{x}^* merupakan solusi kesetimbangan yang memenuhi Persamaan (2.12), Persamaan (2.17) dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 - x_1^* \\ x_2 - x_2^* \\ x_3 - x_3^* \\ x_4 - x_4^* \\ \vdots \\ x_n - x_n^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_3}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_4}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}^*=(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)} \cdot \begin{bmatrix} x_1 - x_1^* \\ x_2 - x_2^* \\ x_3 - x_3^* \\ x_4 - x_4^* \\ \vdots \\ x_n - x_n^* \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

Apabila dilakukan pemisalan $y_i = x_i - x_i^*, i = 1, 2, \dots, n$, dan

$$\mathbf{J}_f(\mathbf{x}^*) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_3}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_4}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}^*=(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)} \quad (2.19)$$

dengan matrik $\mathbf{J}_f(\mathbf{x}^*)$ merupakan matrik *Jacobian* dari Sistem (2.11) di sekitar titik kesetimbangan \mathbf{x}^* , Persamaan (2.18) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{J}_f(\mathbf{x}^*) \cdot \mathbf{y} \quad (2.20)$$

Persamaan (2.20) merupakan Sistem (2.11) di sekitar titik kesetimbangan $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$

(Boyce & Dprima, 2009).

2.10 Analisis Kestabilan untuk Sistem Tak Linier

Pandang matrik Jacobian disekitar titik kesetimbangan dari Sistem (2.11) yaitu (2.19). Jika $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, n$ merupakan nilai *eigen* dari matrik yang diberikan (2.19), maka menurut (Boyce & Dprima, 2009)

- Sistem (2.11) disekitar titik kesetimbangan \mathbf{x}^* bersifat stabil asimptotik dan sistem tak linier (2.11) stabil asimptotik, jika semua bagian real dari $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, n$ bernilai negatif,
- Sistem (2.11) disekitar titik kesetimbangan \mathbf{x}^* bersifat tidak stabil dan sistem tak linier (2.11) tidak stabil, jika setidaknya ada salah satu nilai *eigen* $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, n$ yang memiliki bagian real positif,
- Sistem (2.11) disekitar titik kesetimbangan \mathbf{x}^* bersifat stabil dan sistem tak linier (2.11) tidak dapat ditentukan, jika setidaknya terdapat salah satu nilai *eigen* $\lambda = \pm qj$ atau $\lambda = 0$.

Oleh karena itu, analisis kestabilan sistem di sekitar titik kesetimbangan dengan teorema nilai *eigen* dapat digunakan untuk menganalisis kestabilan sistem tak linier. Asalkan nilai-nilai *eigen* dari matrik \mathbf{J}_f tidak ada yang berbentuk imajiner murni atau nol.

2.11 Kriteria Routh-Hurwitz

Nilai-nilai karakteristik dari matriks \mathbf{A} adalah akar-akar dari polinomial

$$p(s) = \det(sI - \mathbf{A}) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + a_{n-2} s^{n-2} + \dots + a_1 s + a_0 \quad (2.21)$$

dengan $a_n = 1$. Kriteria kestabilan *Routh-Hurwitz* dapat dipakai untuk menguji langsung kestabilan melalui koefisien a_i tanpa menghitung akar-akar dari polinomial yang ada. Metode pengujian kestabilan ini dilakukan dengan melakukan penabelan dan suatu aturan penghitungan dari koefisien a_i akan diketahui bahwa apakah polinomial yang diberikan oleh Persamaan (2.21) semua akar-akar bagian realnya negatif.

Berikut diberikan algoritma dengan beberapa kasus untuk mengetahui polinomial dalam Persamaan (2.21) dengan $a_n \neq 0$ apakah semua akar-akar bagian realnya negatif. Diberikan suatu polinomial

$$q(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + a_{n-2} s^{n-2} + \dots + a_1 s + a_0 \quad (2.22)$$

susun tabel sebagai berikut :

Tabel 2.6 Tabel *Routh-Hurwitz*

s^n	a_n	a_{n-2}	a_{n-4}	\dots
s^{n-1}	a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}	\dots
s^{n-2}	b_1	b_2	b_3	\dots
s^{n-3}	c_1	c_2	c_3	\dots
\vdots	\vdots			
s^0	q			

di mana $b_1, b_2, \dots, c_1, c_2, \dots$ dan q secara rekursif didapat dari:

$$b_1 = \frac{a_{n-1}a_{n-2} - a_n a_{n-3}}{a_{n-1}}, b_2 = \frac{a_{n-1}a_{n-4} - a_n a_{n-5}}{a_{n-1}}, \dots$$

$$c_1 = \frac{b_1 a_{n-3} - b_2 a_{n-1}}{b_1}, c_2 = \frac{b_1 a_{n-5} - b_3 a_{n-1}}{b_1}, \dots$$

Kriteria *Routh-Hurwitz* menyimpulkan bahwa banyaknya perubahan tanda dalam kolom pertama Tabel 2.6 sama dengan banyaknya akar-akar polinomial (2.22) yang bagian realnya positif. Jadi apabila kolom pertama dalam tabel *Routh-Hurwitz* tidak ada perubahan tanda (semuanya bertanda positif atau semuanya bertanda negatif), maka semua akar bagian realnya adalah tak-positif. Jika polinomial (2.22) merupakan polinomial akar-akar karakteristik dari matrik \mathbf{A} di mana $\dot{x} = \mathbf{A}x(t)$, maka sistem ini adalah stabil (Subiono, 2013).

2.12 Teorema Fundamental Kalkulus I dan Aturan integral *Leibniz*

Diberikan suatu fungsi f kontinu dan tidak negatif pada selang $[a, b]$, dan jika $A(x)$ adalah fungsi luas daerah di bawah kurva $y = f(x)$ sepanjang selang $[a, x], x \leq b$, maka $A'(x) = f(x)$. Apabila $A(x)$ dinyatakan dalam bentuk integral,

$$A(x) = \int_a^x f(t) dt, \quad (2.23)$$

(di mana kita menggunakan t dan bukan x sebagai variabel integran Persamaan (2.23) untuk menghindari kebingungan dengan x yang muncul sebagai batas atas integrasi). Oleh karena itu, hubungan $A'(x) = f(x)$ dapat dinyatakan sebagai,

$$\frac{d}{dx} \left[\int_a^x f(t) dt \right] = f(x). \quad (2.24)$$

Berikut adalah kasus khusus yang berlaku bahkan jika f memiliki nilai negatif untuk Persamaan (2.24) (Anton, Bivens, & Davis, 2012).

Teorema 2.1. (Teorema Fundamental Kalkulus I) Jika f merupakan fungsi kontinu pada interval $[a, x], a \in \mathbb{R}$, maka f memiliki antiturunan pada interval itu. Secara khusus, jika terdapat satu titik pada interval $[a, x], a \in \mathbb{R}$, maka fungsi F yang didefinisikan oleh,

$$F(x) = \int_a^x f(t) dt$$

adalah antiturunan dari f ; yang artinya $F'(x) = f(x)$ untuk setiap x di dalam interval, atau dengan notasi alternatif

$$\frac{d}{dx} \left[\int_a^x f(t) dt \right] = f(x), \quad (2.25)$$

Bukti. Misalkan bahwa x bukan merupakan titik ujung pada interval, maka berdasarkan definisi

turunan,

$$\begin{aligned}
 F'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{F(x+h) - F(x)}{h} \\
 &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left[\int_a^{x+h} f(t) dt - \int_a^x f(t) dt \right] \\
 &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left[\int_a^{x+h} f(t) dt + \int_x^a f(t) dt \right] \\
 &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left[\int_x^{x+h} f(t) dt \right].
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

Menggunakan teorema nilai rata-rata untuk integral, Persamaan (2.26) menjadi,

$$\frac{1}{h} \left[\int_x^{x+h} f(t) dt \right] = \frac{1}{h} [h f(t^*)] = f(t^*) \tag{2.27}$$

dimana t^* merupakan suatu nilai diantara x dan $x+h$. Karena t^* terjebak diantara x dan $x+h$ untuk $h \rightarrow 0$, ini menunjukkan $t^* \rightarrow x$. Oleh karena itu, kontinuitas f pada x berakibat $f(t^*) \rightarrow f(x)$ ketika $h \rightarrow 0$. Ini menunjukkan,

$$F'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \left(\frac{1}{h} \int_x^{x+h} f(t) dt \right) = \lim_{h \rightarrow 0} f(t^*) = f(x).$$

□

Selanjutnya diberikan suatu formula untuk mengubah persamaan integral menjadi persamaan differensial,

Teorema 2.2. (Aturan Integral Leibniz) Misalkan $f(x,t)$ merupakan suatu fungsi sedemikian sehingga $f(x,t)$ dan turunan parsial $f_x(x,t)$ adalah kontinu t dan x pada bidang- xt , termasuk $a(x) \leq t \leq b(x), x_0 \leq x \leq x_1$. Misalkan bahwa fungsi $a(x)$ dan $b(x)$ keduanya kontinu dan keduanya memiliki turunan kontinu pada $a(x) \leq t \leq b(x)$. Maka untuk $x_0 \leq x \leq x_1$,

$$\frac{d}{dx} \left(\int_{a(x)}^{b(x)} f(x,t) dt \right) = f(x,b(x)) \frac{d}{dx} b(x) - f(x,a(x)) \frac{d}{dx} a(x) + \int_{a(x)}^{b(x)} \frac{\partial}{\partial x} f(x,t) dt. \tag{2.28}$$

Bukti. Misalkan,

$$\phi(x, a(x), b(x)) = \int_{a(x)}^{b(x)} f(x,y) dy \tag{2.29}$$

maka turunan dari fungsi ϕ terhadap x adalah,

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial a} \frac{da}{dx} + \frac{\partial \phi}{\partial b} \frac{db}{dx}. \tag{2.30}$$

Persamaan (2.30) perlu untuk dicari setiap komponennya. Pertama, komponen $\frac{\partial \phi}{\partial a}$ dibentuk

dengan mendapatkan turunan pertama Persamaan (2.29) terhadap a ,

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \phi}{\partial a} &= \frac{\partial}{\partial a} \left(\int_{a(x)}^{b(x)} f(x,y) dy \right) \\
 &= \frac{\partial}{\partial a} \left(\int_{a(x)}^{b(x)} \frac{\partial F}{\partial y} dy \right) \\
 &= \frac{\partial}{\partial a} F(x, b(x)) - \frac{\partial}{\partial a} F(x, a(x)) \\
 &= -\frac{\partial}{\partial a} F(x, a(x)) \\
 &= -f(x, a(x)).
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

Kedua, komponen $\frac{\partial \phi}{\partial b}$ dibentuk dengan mendapatkan turunan pertama Persamaan (2.29) terhadap b ,

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \phi}{\partial b} &= \frac{\partial}{\partial b} \left(\int_{a(x)}^{b(x)} f(x,y) dy \right) \\
 &= \frac{\partial}{\partial b} \left(\int_{a(x)}^{b(x)} \frac{\partial F}{\partial y} dy \right) \\
 &= \frac{\partial}{\partial b} F(x, b(x)) - \frac{\partial}{\partial b} F(x, a(x)) \\
 &= \frac{\partial}{\partial b} F(x, b(x)) \\
 &= f(x, b(x)).
 \end{aligned} \tag{2.32}$$

Mensubstitusikan Persamaan (2.31) dan Persamaan (2.32) ke Persamaan (2.30), terbukti bahwa Persamaan (2.28) benar,

$$\frac{d}{dx} \left(\int_{a(x)}^{b(x)} f(x,t) dt \right) = \int_{a(x)}^{b(x)} \frac{\partial}{\partial x} f(x,t) dt - f(x, a(x)) \frac{d}{dx} a(x) + f(x, b(x)) \frac{d}{dx} b(x).$$

□

BAB III METODOLOGI

Pada bab ini dijelaskan secara umum mengenai urutan pelaksanaan Tugas Akhir yang berlangsung selama 8 bulan, dengan langkah-langkah yang dilakukan sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pada tahap ini akan dipelajari rujukan-rujukan penelitian (C. Caginalp, 2019),(G. Caginalp & Balenovich, 1999),(C. Caginalp & Caginalp, 2020). Selanjutnya akan dipelajari teori-teori mengenai analisis model sistem dinamik antara lain : definisi titik tetap, teorema kestabilan nilai *eigen*, kriteria *Routh Hurwitz*.

2. Pengembangan model sistem pasar *cryptocurrency*

Pada tahap ini akan dilakukan konstruksi sistem dinamik pasar *cryptocurrency* yang terdiri dari *Asset Flow Equations*, kemudian persamaan persamaan yang mendefinisikan perilaku *trader* seperti *trend-based component*, *value-component*, *liquidity component* seperti yang dijelaskan oleh (C. Caginalp, 2019).

3. Analisis kestabilan sistem pasar *cryptocurrency*

Pada tahap ini didapatkan titik kesetimbangan sistem pasar *cryptocurrency*. Kemudian, model sistem pasar *cryptocurrency* dilinierkan disekitar titik kesetimbangan. Setelah diperoleh sistem disekitar titik kesetimbangan, dilakukan uji kestabilan sistem dengan teorema nilai *eigen* dan *Routh Hurwitz*. Hasil analisis kestabilan menginterpretasikan syarat parameter agar sistem pasar stabil. Selain model sistem pasar *cryptocurrency*, model sistem pasar *cryptocurrency* yang bebas sentimen (mengasumsikan $\xi_1 = \xi_2 = 0$) dan model sistem pasar bebas *value component* (mengasumsikan $\xi_2 = 0$) diuji kestabilannya dengan cara yang sama.

4. Plot Kestabilan

Berdasarkan hasil analisis kestabilan, diperoleh himpunan nilai-nilai parameter yang membuat sistem pasar stabil dalam bentuk pertidaksamaan. Pertidaksamaan hasil analisis kestabilan di *plot* ke ruang \mathbb{R}_+^2 , dengan setiap titik merepresentasikan pasangan parameter-parameter terkait sistem pasar *cryptocurrency*.

5. Simulasi

Pada tahap ini dilakukan pengkonstruksian dua jenis sistem dinamik. Pertama, adalah sistem dinamik yang menggunakan parameter yang menyebabkan sistem pasar stabil. Kedua, adalah sistem dinamik yang menggunakan parameter yang menyebabkan sistem pasar tidak stabil. Kemudian, dilakukan *plot phase portrait* pada bidang *phase* dan solusi untuk berbagai kondisi awal menggunakan *Python*. Setelah diperoleh hasil simulasi, dilakukan analisis hubungan antara perilaku sistem pasar dan perspektif ekonomi.

6. Penarikan kesimpulan

Pada tahap ini ditarik kesimpulan mengenai kestabilan sistem pasar *cryptocurrency*. Kesimpulan yang ditarik adalah faktor yang paling mempengaruhi harga aset *cryptocurrency* menjadi stabil berdasarkan ketiga faktor yang diduga oleh (C. Caginalp, 2019).

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Model Sistem Pasar *Cryptocurrency*

Didefinisikan sistem pasar *cryptocurrency* merupakan suatu sistem yang terdiri atas dua pihak. Pihak pertama adalah penjual aset yang disebut *exchanger* atau *miner* dari aset *cryptocurrency*. Pihak kedua adalah para pembeli aset *cryptocurrency* atau disebut *trader*. Di dalam sistem pasar terjadi transaksi jual beli *cryptocurrency* antara penjual dan pembeli dalam selang waktu berhingga.

Pada (C. Caginalp, 2019) telah dikonstruksikan model sistem pasar *cryptocurrency* dengan mempertimbangkan tiga faktor fluktuasi harga aset. Ketiga faktor tersebut ditetapkan menjadi variabel-variabel model sistem pasar *cryptocurrency*. Selanjutnya diberikan istilah-istilah dalam model sistem pasar *cryptocurrency* sebagai berikut:

1. harga *cryptocurrency* $P(t)$ merupakan harga beli satuan aset *cryptocurrency* pada waktu t ,
2. *trend-based component* $\xi_1(t)$ merupakan nilai yang mencerminkan kecenderungan *trader* untuk membeli atau menjual *cryptocurrency* mengikuti arah tren pada waktu t ,
3. *perceived value* $P_a(t)$ merupakan harga *cryptocurrency* yang diyakini sebagai nilai fundamental aset oleh *trader* pada waktu t , mengingat *cryptocurrency* sesungguhnya tidak memiliki nilai fundamental,
4. *value component* $\xi_2(t)$ merupakan nilai yang mencerminkan kecenderungan *trader* untuk membeli atau menjual *cryptocurrency* berdasarkan adanya diskon dari harga yang diyakini atau *perceived value* $P_a(t)$ pada waktu t ,
5. *liquidity component* $L(t)$ merupakan nilai yang mencerminkan tingkat kemampuan pasar untuk membeli atau menjual *cryptocurrency* secara cepat tanpa mempengaruhi harga yang signifikan.

Menggunakan istilah yang diberikan akan dikembangkan model matematika sistem pasar *cryptocurrency*.

4.1.1 *Asset Flow Equations*

Diberikan harga *cryptocurrency* yang dinotasikan $P(t)$, jumlah unit *cryptocurrency* dinotasikan $N(t)$, dan jumlah uang yang tersedia $M(t)$. *Liquidity price* pada waktu ke t yaitu $L(t)$ merupakan jumlah uang pada saat ke t dibagi dengan jumlah aset *cryptocurrency* pada saat ke t (G. Caginalp & Balenovich, 1999),

$$L(t) = \frac{M(t)}{N(t)}. \quad (4.1)$$

Didefinisikan *fraction of wealth cryptocurrency* B yang merupakan nominal aset dibagi kekayaan total. Kekayaan total merupakan nominal aset *cryptocurrency* ditambah dengan jumlah

uang yang ada di dalam sistem pasar. *Fraction of wealth* dapat diformulasikan sebagai berikut (G. Caginalp & Balenovich, 1999),

$$B(t) = \frac{N(t)P(t)}{N(t)P(t) + M(t)}. \quad (4.2)$$

Diberikan k merupakan peluang seorang *trader* menggunakan 1 satuan uang untuk membeli *cryptocurrency* dari *cash* ke asset). Selanjutnya, permintaan aset D merupakan nilai k dikalikan rasio *cash* dengan kekayaan total yang tersedia di dalam sistem. Permintaan aset secara khusus diartikan sebagai banyaknya uang yang digunakan para pembeli untuk membeli aset *cryptocurrency* (G. Caginalp & Balenovich, 1999),

$$D(t) = k(1 - B(t)) = k \frac{M(t)}{N(t)P(t) + M(t)}. \quad (4.3)$$

Selanjutnya penawaran aset *cryptocurrency* saat ke t dinotasikan $S(t)$ merupakan *fraction of wealth cryptocurrency* $B(t)$ yang tersedia dikurangi dengan *cryptocurrency* yang telah terjual. Oleh karena itu, penawaran $S(t)$ merupakan sisa aset *cryptocurrency* setelah adanya jual beli di dalam pasar *cryptocurrency* (G. Caginalp & Balenovich, 1999),

$$S(t) := B(t) - kB(t). \quad (4.4)$$

Apabila diambil model *excess demand* (2.2) untuk waktu $[t, t + h]$ dengan h mendekati nol dan misalkan $P_i = P(t + h), P_{i-1} = P(t), D_{i-1} = D(t), S_{i-1} = S(t)$ didapat,

$$\tau_0 \lim_{h \rightarrow 0} \frac{P(t+h) - P(t)}{h P(t)} = \lim_{h \rightarrow 0} \left(\frac{D(t)}{S(t)} - 1 \right).$$

Menggunakan definisi turunan, didapat model *excess demand* kontinu didefinisikan oleh

$$\frac{\tau_0}{P} \frac{dP}{dt} = \frac{D}{S} - 1. \quad (4.5)$$

Berdasarkan definisi dari permintaan D dan penawaran S masing-masing diberikan oleh formula (4.3) dan (4.4), didapat

$$\frac{\tau_0}{P} \frac{dP}{dt} = \frac{k(1 - B)}{B(1 - k)} - 1. \quad (4.6)$$

Berdasarkan definisi dari *fraction of wealth* pada (4.2), Persamaan (4.6) menjadi

$$\frac{\tau_0}{P} \frac{dP}{dt} = \frac{k}{1 - k} \left(1 - \frac{NP}{NP + M} \right) - 1. \quad (4.7)$$

Persamaan (4.7) dapat disederhanakan menjadi

$$\frac{\tau_0}{P} \frac{dP}{dt} = \frac{k}{1 - k} \frac{\frac{M}{NP + M}}{\frac{NP}{NP + M}} - 1 \quad (4.8)$$

Persamaan (4.8) disederhanakan menjadi

$$\frac{\tau_0}{P} \frac{dP}{dt} = \frac{k}{1-k} \frac{M}{NP} - 1. \quad (4.9)$$

Berdasarkan definisi dari *liquidity value* pada (4.1), Persamaan (4.9) menjadi

$$\frac{\tau_0}{P} \frac{dP}{dt} = \frac{k}{1-k} \frac{L}{P} - 1. \quad (4.10)$$

Diberikan asumsi nilai k merupakan fungsi jenis tanh yang memuat motivasi *trader* (G. Caginalp & Balenovich, 1999)

$$k := \frac{1}{2} + \frac{\tanh \xi}{2} \quad (4.11)$$

dengan $\xi := \xi_1(t) + \xi_2(t)$ merupakan fungsi yang menyatakan sentimen *trader* terhadap pasar *cryptocurrency*. Apabila k dideretkan menurut deret *MacLaurin* maka didapat,

$$k = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\xi - \frac{1}{3} \xi^3 + \frac{2}{15} \xi^5 - \dots \right). \quad (4.12)$$

Ambil linierisasi dari fungsi tanh maka fungsi (4.12) sebagai k (G. Caginalp & Balenovich, 1999), didapat

$$k = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \xi \quad (4.13)$$

dengan nilai variabel k berada pada selang $[0, 1]$ untuk memastikan probabilitasnya tidak negatif.

Berdasarkan formula k yakni (4.13), persamaan (4.10) dapat ditulis sebagai

$$\frac{\tau_0}{P} \frac{dP}{dt} = \left(\frac{1+\xi}{1-\xi} \right) \frac{L}{P} - 1. \quad (4.14)$$

Apabila suku $\frac{1+\xi}{1-\xi}$ dilinierisasi menggunakan deret *MacLaurin* didapat

$$\frac{\tau_0}{P} \frac{dP}{dt} = (1 + 2\xi) \frac{L}{P} - 1.$$

perlu diperhatikan bahwa $\xi := \xi_1(t) + \xi_2(t)$, maka persamaan di atas dapat ditulis sebagai

$$\frac{\tau_0}{P} \frac{dP}{dt} = (1 + 2\xi_1 + 2\xi_2) \frac{L}{P} - 1 \quad (4.15)$$

yang merupakan *Asset Flow Equations*.

4.1.2 Trend Based Component

Trend-based component saat ke t merupakan nilai yang mencerminkan kecenderungan *trader* membeli atau menjual *cryptocurrency* mengikuti arah tren saat waktu ke t . Nilai ini merupakan jumlahan dari nilai rata-rata terbobot eksponensial seluruh perubahan harga relatif *cryptocurrency* $\frac{\tau_0}{P(\tau)} \frac{dP}{d\tau}$ pada interval-interval waktu kontinu $[t - c_1, t]$, $[t - 2c_1, t - c_1]$, $[t - 3c_1, t - 2c_1]$, \dots , $(-\infty, t - nc_1]$. Kemudian, untuk setiap perubahan harga relatif di setiap titik waktu kontinu dikalikan dengan bobot $e^{-\frac{(t-\tau)}{c_1}}$. Pengalihan dengan bobot ini dilakukan karena apabila semakin kecil nilai τ (waktu lampau) maka perubahan harga relatif semakin berdampak kecil

bagi persepsi *trader*. Hal ini terjadi karena *trader* cenderung mengingat perubahan harga terbaru daripada masa lampau. Berikut merupakan model matematika untuk *trend based component* (G. Caginalp & Balenovich, 1999) :

$$\xi_1(t) = \frac{q_1}{c_1} \int_{-\infty}^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c_1}\right) \frac{\tau_0}{P(\tau)} \frac{dP(\tau)}{d\tau} d\tau. \quad (4.16)$$

Berdasarkan (C. Caginalp & Caginalp, 2018) *trend-based component* memiliki satuan *dollar*.

Nilai *trend-based component* negatif menunjukkan kecenderungan *trader* untuk menjual *cryptocurrency*. Sedangkan nilai *trend-based component* positif menunjukkan kecenderungan *trader* untuk membeli *cryptocurrency*. Kemudian, nilai $\frac{dP}{dt}$ negatif menunjukkan bahwa harga *cryptocurrency* turun terhadap waktu. Sedangkan, nilai $\frac{dP}{dt}$ positif menunjukkan bahwa harga *cryptocurrency* naik terhadap waktu. Adapun parameter q_1 merupakan ukuran keinginan *trader* untuk membeli atau menjual aset mengikuti arah tren. Oleh karena itu, jika q_1 semakin besar maka ada dua kemungkinan yang terjadi

1. *Trend-based component* bernilai positif dan semakin besar faktor *trend-based component* dalam menentukan keputusan pembelian *cryptocurrency*, apabila harga *cryptocurrency* naik.
2. *Trend-based component* bernilai negatif dan semakin besar faktor *trend-based component* dalam menentukan keputusan penjualan *cryptocurrency*, apabila harga *cryptocurrency* turun.

Sebaliknya, jika q_1 semakin kecil maka semakin kecil faktor *trend-based component* dalam menentukan keputusan pembelian atau penjualan *cryptocurrency*. Adapun c_1^{-1} merupakan parameter yang menunjukkan bobot pengaruh perubahan harga relatif di setiap titik waktu terhadap persepsi *trader*. Oleh karena itu, jika c_1^{-1} semakin besar, maka semakin besar pengaruh perubahan harga relatif di setiap titik terhadap persepsi *trader*, begitupula sebaliknya. Sedangkan, c_1 merupakan *timescale* atau panjang selang waktu pengamatan *trader*. Oleh karena itu, jika c_1 semakin panjang maka semakin lama *trader* mengamati perubahan harga relatif, begitupula sebaliknya.

4.1.3 Perceived Value

Perceived value merupakan harga *cryptocurrency* yang diyakini oleh *trader* dan diasumsikan sebagai nilai fundamental *cryptocurrency*. Formula *Perceived value* diperlukan karena *cryptocurrency* sesungguhnya tidak memiliki nilai fundamental karena tidak ada aset yang mendasarinya. *Perceived value* didapatkan dengan menjumlahkan nilai rata-rata terbobot eksponensial seluruh harga *cryptocurrency* $P(\tau)$ pada interval-interval waktu kontinu $[t - c_3, t], [t - 2c_3, t - c_3], [t - 3c_3, t - 2c_3], \dots, (-\infty, t - nc_3]$. Kemudian, untuk setiap titik waktu kontinu, harga dikalikan dengan bobot $e^{-\frac{(t-\tau)}{c_3}}$. Hal ini mengingat *trader* cenderung mengingat harga terbaru daripada harga masa lampau. Berikut merupakan model matematika untuk *perceived-value* (C. Caginalp, 2019) :

$$P_a(t) = \frac{1}{c_3} \int_{-\infty}^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c_3}\right) P(\tau) d\tau. \quad (4.17)$$

Adapun parameter c_3^{-1} merupakan parameter yang menunjukkan bobot waktu yang menentukan seberapa berpengaruh perubahan harga relatif di setiap titik waktu, terhadap persepsi *trader*.

Sedangkan, c_3 merupakan *timescale* atau panjang selang waktu pengamatan *trader*. Oleh karena itu, jika c_3 semakin besar maka semakin lama *trader* mengamati harga *cryptocurrency*, begitupula sebaliknya.

4.1.4 Value Component

Value component merupakan nilai yang mencerminkan kecenderungan untuk membeli atau menjual *cryptocurrency* berdasarkan adanya diskon dari *perceived value* $P_a(t)$. Nilai ini merupakan jumlahan dari nilai rata-rata terbobot eksponensial seluruh diskon terhadap *perceived value* *cryptocurrency* $\frac{P_a(\tau)-P(\tau)}{P(\tau)}$ pada interval-interval waktu kontinu $[t - c_2, t], [t - 2c_2, t - c_2], [t - 3c_2, t - 2c_2], \dots, (-\infty, t - nc_2]$. Kemudian, untuk setiap diskon terhadap *perceived value* di setiap titik waktu kontinu dikalikan dengan bobot $e^{-\frac{(t-\tau)}{c_2}}$. Pengalihan dengan bobot ini dilakukan karena apabila semakin kecil nilai τ (waktu lampau) maka diskon terhadap *perceived value* semakin berdampak kecil bagi persepsi *trader* terhadap *cryptocurrency*. Hal ini dapat terjadi karena *trader* cenderung mengingat diskon terhadap *perceived value* terbaru daripada di masa lampau. Berikut merupakan model matematika untuk *value component* (G. Caginalp & Balenovich, 1999) :

$$\xi_2(t) = \frac{q_2}{c_2} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{(t-\tau)}{c_2}\right) \frac{P_a(\tau) - P(\tau)}{P(\tau)} d\tau. \quad (4.18)$$

Berdasarkan (C. Caginalp & Caginalp, 2018) *value-component* memiliki satuan *dollar* Nilai *value component* negatif menunjukkan kecenderungan *trader* untuk menjual *cryptocurrency* akibat faktor ini. Sedangkan nilai *value component* positif menunjukkan kecenderungan *trader* untuk membeli *cryptocurrency* akibat faktor ini. Kemudian, nilai $\frac{P_a-P}{P}$ positif menunjukkan bahwa terdapat diskon pembelian *cryptocurrency* dari *perceived value*, dengan kata lain *cryptocurrency* memiliki harga *undervalued*. Sedangkan, jika $\frac{P_a-P}{P}$ negatif maka *cryptocurrency* memiliki harga *overvalued*.

Adapun parameter q_2 merupakan ukuran keinginan *trader* untuk membeli atau menjual aset berdasarkan nilai fundamental. Oleh karena itu, jika q_2 semakin besar maka ada dua kemungkinan yang terjadi,

1. *Value component* bernilai negatif dan semakin besar faktor *value component* dalam menentukan keputusan penjualan *cryptocurrency*, apabila harga *cryptocurrency* *overvalued*.
2. *Value component* bernilai positif dan semakin besar faktor *value component* dalam menentukan keputusan pembelian *cryptocurrency*, apabila harga *cryptocurrency* *undervalued*.

Sebaliknya, jika q_2 kecil maka semakin kecil faktor *value component* dalam menentukan keputusan pembelian atau penjualan *cryptocurrency*. Adapun parameter c_2^{-1} merupakan parameter yang menunjukkan bobot pengaruh diskon *perceived value* di setiap titik waktu terhadap persepsi *trader*. Oleh karena itu, jika c_2^{-1} semakin besar, maka semakin besar pengaruh diskon terhadap *perceived value* terhadap persepsi *trader*, begitupula sebaliknya. Sedangkan, c_2 merupakan *timescale* atau panjang selang waktu pengamatan *trader*. Oleh karena itu, jika c_2 semakin panjang maka semakin lama *trader* mengamati diskon terhadap *perceived value* *cryptocurrency*, begitupula sebaliknya.

4.1.5 Liquidity component

Liquidity component merupakan nilai yang mencerminkan tingkat kemampuan para pelaku pasar untuk membeli atau menjual *cryptocurrency* dengan cepat dan tanpa mempengaruhi harga

secara signifikan. Nilai ini merupakan penjumlahan likuiditas dasar L_0 konstan independen tren saat ini ditambah dengan likuiditas tambahan yang muncul dari faktor tren. Penjumlahan likuiditas tambahan dilakukan karena faktor tren berpengaruh secara signifikan karena secara psikologis *trader* akan mentransaksikan lebih banyak aset ketika terjadi tren naik atau turun. Berikut merupakan model matematika untuk *Liquidity Component* (C. Caginalp, 2019) :

$$L(t) = L_0 + \frac{L_0}{c} q \int_{-\infty}^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c}\right) \frac{\tau_0}{P} \frac{dP}{d\tau} d\tau. \quad (4.19)$$

Nilai faktor tren pada *liquidity component* dibedakan dengan ξ_1 karena likuiditas pasar harus berubah nilainya terhadap waktu meskipun tidak ada sentimen *trader* terhadap pasar *cryptocurrency*.

Adapun parameter q dan c merupakan parameter yang merepresentasikan bobot faktor dan *timescale* dari *liquidity component*. Parameter q dan c memiliki karakteristik dan peran yang sama seperti q_1, q_2 dan c_1, c_2 .

4.1.6 Sistem Dinamik Pasar *Cryptocurrency*

Untuk mendapatkan sistem pasar *cryptocurrency*, Persamaan (4.16)-(4.18) harus dinyatakan sebagai Persamaan Diferensial. Pertama, Persamaan (4.16) dapat dituliskan sebagai

$$\frac{d}{dt}(c_1 \xi_1) = q_1 \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c_1}\right) \frac{\tau_0}{P} \frac{dP}{d\tau} d\tau \quad (4.20)$$

berdasarkan definisi *Asset Flow Equations* Persamaan (4.15) dan menggunakan limit untuk integral selang tak wajar, Persamaan (4.20) menjadi

$$c_1 \dot{\xi}_1 = q_1 \lim_{p \rightarrow -\infty} \frac{d}{dt} \left(\int_p^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c_1}\right) \left\{ (1 + 2\xi_1 + 2\xi_2) \frac{L}{P} - 1 \right\} d\tau \right). \quad (4.21)$$

Misalkan fungsi $g(t, \tau)$ sebagai berikut

$$g(t, \tau) = \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c_1}\right) \left\{ (1 + 2\xi_1(\tau) + 2\xi_2(\tau)) \frac{L(\tau)}{P(\tau)} - 1 \right\} \quad (4.22)$$

menggunakan Formula (2.28), didapat

$$\begin{aligned} \lim_{p \rightarrow -\infty} \frac{d}{dt} \left(\int_p^t g(t, \tau) d\tau \right) &= \lim_{p \rightarrow -\infty} \left(\int_p^t \frac{\partial}{\partial t} g(t, \tau) d\tau + g(t, t) \cdot 1 - g(t, p) \cdot 0 \right) \\ &= -\frac{1}{c_1} \int_{-\infty}^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c_1}\right) \left\{ (1 + 2\xi_1(\tau) + 2\xi_2(\tau)) \frac{L(\tau)}{P(\tau)} - 1 \right\} d\tau \\ &\quad + (1 + 2\xi_1(t) + 2\xi_2(t)) \frac{L(t)}{P(t)} - 1 \end{aligned} \quad (4.23)$$

substitusi Persamaan (4.23) ke Persamaan (4.21), didapat

$$c_1 \dot{\xi}_1 = -\frac{q_1}{c_1} \int_{-\infty}^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c_1}\right) \left\{ (1 + 2\xi_1(\tau) + 2\xi_2(\tau)) \frac{L(\tau)}{P(\tau)} - 1 \right\} d\tau + q_1 \left\{ (1 + 2\xi_1(t) + 2\xi_2(t)) \frac{L(t)}{P(t)} - 1 \right\} \quad (4.24)$$

berdasarkan definisi *trend-based component* Persamaan (4.16), Persamaan (4.24) menjadi

$$c_1 \dot{\xi}_1 = q_1 \left\{ (1 + 2\xi_1 + 2\xi_2) \frac{L}{P} - 1 \right\} - \xi_1. \quad (4.25)$$

Kedua, Persamaan (4.17) dapat dituliskan sebagai

$$\frac{d}{dt}(c_3 P_a) = \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c_3}\right) d\tau \quad (4.26)$$

menggunakan limit untuk integral selang tak wajar, Persamaan (4.26) menjadi

$$c_3 \dot{P}_a = \lim_{p \rightarrow -\infty} \frac{d}{dt} \int_p^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c_3}\right) P(\tau) d\tau. \quad (4.27)$$

Misalkan fungsi $f(t, \tau)$ sebagai berikut

$$f(t, \tau) = \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c_3}\right) P(\tau) \quad (4.28)$$

menggunakan Formula (2.28), didapat

$$\begin{aligned} \lim_{p \rightarrow -\infty} \frac{d}{dt} \left(\int_p^t f(t, \tau) d\tau \right) &= \lim_{p \rightarrow -\infty} \left(\int_p^t \frac{\partial}{\partial t} f(t, \tau) d\tau + f(t, t) \cdot 1 - f(t, p) \cdot 0 \right) \\ &= -\frac{1}{c_3} \int_{-\infty}^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c_3}\right) P(\tau) d\tau + P(t) \end{aligned} \quad (4.29)$$

substitusi Persamaan (4.29) ke Persamaan (4.27), didapat

$$c_3 \dot{P}_a = -\frac{1}{c_3} \int_{-\infty}^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c_3}\right) P(\tau) d\tau + P(t) \quad (4.30)$$

berdasarkan definisi dari *perceived value* Persamaan (4.17), Persamaan (4.30) menjadi

$$c_3 \dot{P}_a = P - P_a. \quad (4.31)$$

Ketiga, Persamaan (4.18) dapat dituliskan sebagai

$$\frac{d}{dt}(c_2 \xi_2) = q_2 \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c_2}\right) \frac{P_a(\tau) - P(\tau)}{P(\tau)} d\tau \quad (4.32)$$

menggunakan limit untuk integral selang tak wajar, Persamaan (4.32) menjadi

$$c_2 \dot{\xi}_2 = q_2 \lim_{p \rightarrow -\infty} \frac{d}{dt} \int_p^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c_2}\right) \frac{P_a(\tau) - P(\tau)}{P(\tau)} d\tau. \quad (4.33)$$

Misalkan fungsi $h(t, \tau)$ sebagai berikut

$$h(t, \tau) = \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c_2}\right) \frac{P_a(\tau) - P(\tau)}{P(\tau)} \quad (4.34)$$

menggunakan Formula (2.28), didapat

$$\begin{aligned} \lim_{h \rightarrow -\infty} \frac{d}{dt} \left(\int_p^t h(t, \tau) d\tau \right) &= \lim_{p \rightarrow -\infty} \left(\int_p^t \frac{\partial}{\partial t} h(t, \tau) d\tau + h(t, t) \cdot 1 - h(t, p) \cdot 0 \right) \\ &= -\frac{1}{c_2} \int_{-\infty}^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c_2}\right) \frac{P_a(\tau) - P(\tau)}{P(\tau)} d\tau + \frac{P_a(t) - P(t)}{P(t)} \end{aligned} \quad (4.35)$$

substitusi Persamaan (4.35) ke Persamaan (4.33), didapat

$$c_2 \dot{\xi}_2 = -\frac{q_2}{c_2} \int_{-\infty}^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c_2}\right) \frac{P_a(\tau) - P(\tau)}{P(\tau)} d\tau + q_2 \frac{P_a(t) - P(t)}{P(t)} \quad (4.36)$$

berdasarkan definisi dari *value component* Persamaan (4.18), Persamaan (4.33) menjadi

$$c_2 \dot{\xi}_2 = q_2 \frac{P_a - P}{P} - \xi_2. \quad (4.37)$$

Keempat, Persamaan (4.19) dapat dituliskan sebagai

$$\frac{d}{dt}(cL(t)) = \frac{d}{dt} \left(cL_0 + L_0 q \int_{-\infty}^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c}\right) \frac{\tau_0}{P(\tau)} \frac{dP(\tau)}{d\tau} d\tau \right) \quad (4.38)$$

berdasarkan definisi *Asset Flow Equations* Persamaan (4.15) dan menggunakan definisi dari integral tak wajar, Persamaan (4.39) menjadi

$$c \dot{L}(t) = \lim_{p \rightarrow -\infty} \frac{d}{dt} \left(L_0 q \int_p^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c}\right) \left\{ (1 + 2\xi_1(\tau) + 2\xi_2(\tau)) \frac{L(\tau)}{P(\tau)} - 1 \right\} d\tau \right). \quad (4.39)$$

Misalkan fungsi $q(t, \tau)$ sebagai berikut

$$q(t, \tau) = \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c}\right) \left\{ (1 + 2\xi_1(\tau) + 2\xi_2(\tau)) \frac{L(\tau)}{P(\tau)} - 1 \right\} \quad (4.40)$$

menggunakan Formula (2.28), didapat

$$\begin{aligned} \lim_{h \rightarrow -\infty} \frac{d}{dt} \left(\int_p^t q(t, \tau) d\tau \right) &= \lim_{p \rightarrow -\infty} \left(\int_p^t \frac{\partial}{\partial t} q(t, \tau) d\tau + q(t, t) \cdot 1 - q(t, p) \cdot 0 \right) \\ &= -\frac{1}{c} \int_{-\infty}^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c}\right) \left\{ (1 + 2\xi_1(\tau) + 2\xi_2(\tau)) \frac{L(\tau)}{P(\tau)} - 1 \right\} d\tau \\ &\quad + (1 + 2\xi_1(t) + 2\xi_2(t)) \frac{L(t)}{P(t)} - 1 \end{aligned} \quad (4.41)$$

substitusi Persamaan (4.41) ke Persamaan (4.39), didapat

$$c\dot{L}(t) = -\frac{L_0 q}{c} \int_{-\infty}^t \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{c}\right) \left\{ (1 + 2\xi_1(\tau) + 2\xi_2(\tau)) \frac{L(\tau)}{P(\tau)} - 1 \right\} d\tau + L_0 q \left\{ (1 + 2\xi_1(t) + 2\xi_2(t)) \frac{L(t)}{P(t)} - 1 \right\} \quad (4.42)$$

berdasarkan definisi dari *liquidity component* Persamaan (4.19), Persamaan (4.39) menjadi

$$c\dot{L}(t) = L_0 - L + L_0 q \left\{ (1 + 2\xi_1 + 2\xi_2) \frac{L}{P} - 1 \right\} \quad (4.43)$$

Persamaan (4.15), (4.25), (4.31), (4.37), dan (4.43) membentuk sistem pasar *cryptocurrency* sebagai berikut

$$\begin{cases} c_3 \dot{P}_a = P - P_a \\ c_2 \dot{\xi}_2 = q_2 \frac{P_a - P}{P} - \xi_2 \\ \tau_0 \dot{P} = (1 + 2\xi_1 + 2\xi_2) L - P \\ c\dot{L}(t) = L_0 - L + L_0 q \left\{ (1 + 2\xi_1 + 2\xi_2) \frac{L}{P} - 1 \right\} \\ c_1 \dot{\xi}_1 = q_1 \left((1 + 2\xi_1 + 2\xi_2) \frac{L}{P} - 1 \right) - \xi_1 \end{cases} \quad (4.44)$$

Berikut merupakan parameter-parameter dari sistem pasar *cryptocurrency*.

Parameter	Definisi
c	<i>time-scale</i> untuk <i>liquidity value</i> $L(t)$
c_1	<i>time-scale</i> untuk <i>trend-based component</i> ξ_1
c_2	<i>time-scale</i> untuk <i>value component</i> ξ_2
c_3	<i>time-scale</i> untuk <i>perceived value</i> $P_a(t)$
q, q_1	ukuran keinginan <i>trader</i> untuk membeli aset mengikuti arah tren
q_2	ukuran keinginan <i>trader</i> untuk membeli atau menjual aset berdasarkan nilai fundamental
τ_0	laju yang menunjukkan seberapa cepat perubahan harga terjadi per <i>unit excess demand</i> .

4.2 Analisis Kestabilan Sistem Pasar *Cryptocurrency*

Untuk mendapatkan kestabilan Sistem (4.44) menggunakan teorema kestabilan nilai *eigen* dan kriteria *Routh-Hurwitz*. Pada tahap awal, akan didapatkan titik kesetimbangan sistem pasar *cryptocurrency*. Berdasarkan definisi titik kesetimbangan, titik kesetimbangan $(P^*, P_a^*, L^*, \xi_1^*, \xi_2^*)$ memenuhi sistem

$$P^* - P_a^* = 0 \quad (4.45)$$

$$q_2 \frac{P_a^* - P^*}{P^*} - \xi_2^* = 0 \quad (4.46)$$

$$(1 + 2\xi_1^* + 2\xi_2^*) L^* - P^* = 0 \quad (4.47)$$

$$L_0 - L^* + L_0 q \left\{ (1 + 2\xi_1 + 2\xi_2) \frac{L^*}{P^*} - 1 \right\} = 0 \quad (4.48)$$

$$q_1 \left((1 + 2\xi_1^* + 2\xi_2^*) \frac{L^*}{P^*} - 1 \right) - \xi_1^* = 0. \quad (4.49)$$

Persamaan (4.45) memberikan persamaan $P^* = P_a^*$, apabila solusi disubstitusi ke Persamaan (4.46) didapat,

$$\xi_2^* = 0. \quad (4.50)$$

Kemudian, substitusi (4.47) ke (4.48) didapat,

$$L_0 - L^* = 0. \quad (4.51)$$

Persamaan (4.51) memberikan solusi $L^* = L_0$. Kemudian, (4.47) dapat dituliskan sebagai

$$P^* = (1 + 2\xi_1^* + 2\xi_2^*) L^*. \quad (4.52)$$

Apabila (4.52) disubstitusi ke Persamaan (4.49) didapat,

$$q_1 \left(\frac{P^*}{P^*} - 1 \right) - \xi_1^* = 0. \quad (4.53)$$

Persamaan (4.53) memberikan solusi $\xi_1^* = 0$. Kemudian, substitusi solusi ξ_1^* , ξ_2^* , dan L^* ke Persamaan (4.47) didapat,

$$(1 + 2(0) + 2(0)).L_0 - P^* = 0. \quad (4.54)$$

Persamaan (4.54) memberikan solusi $P^* = L_0$, apabila solusi disubstitusi ke Persamaan (4.45) didapat,

$$L_0 - P_a^* = 0 \quad (4.55)$$

Persamaan (4.55) memberikan solusi $P_a^* = L_0$. Berdasarkan semua solusi yang diperoleh dari Sistem Persamaan (4.45), (4.46), (4.47), (4.48), dan (4.49) diperoleh titik kesetimbangan $(P^*, P_a^*, L^*, \xi_1^*, \xi_2^*) = (L_0, L_0, L_0, 0, 0)$. Titik kesetimbangan tersebut menunjukkan bahwa kondisi *steady-state* pada sistem terjadi apabila nilai harga, *perceived value* dan likuiditas sama dengan likuiditas dasar L_0 . Dalam perspektif ekonomi, kondisi pasar dimana harga *cryptocurrency*, *perceived value*, likuiditas bernilai L_0 (likuiditas dasar) adalah pasar bebas resiko. Kondisi pasar bebas resiko paling tidak diharapkan oleh *trader*, karena tidak dapat memperoleh keuntungan dari *cryptocurrency* yang berharga konstan. Oleh karena itu, agar mendapatkan keuntungan *trader* mengharapkan pasar *cryptocurrency* yang tidak stabil.

Selanjutnya akan didapatkan matrik *Jacobian* dari Sistem (4.44) disekitar titik kesetimbangan berdasarkan formula (2.19). Untuk itu, akan dilakukan pemisalan pada ruas kanan Sistem (4.44)

$$f_1(P, P_a, L, \xi_1, \xi_2) = (1 + 2\xi_1 + 2\xi_2) \frac{L}{\tau_0} - \frac{P}{\tau_0} \quad (4.56)$$

$$f_2(P, P_a, L, \xi_1, \xi_2) = \frac{P}{c_3} - \frac{P_a}{c_3} \quad (4.57)$$

$$f_3(P, P_a, L, \xi_1, \xi_2) = \frac{L_0}{c} - \frac{L}{c} + \frac{L_0 q}{c} \left\{ (1 + 2\xi_1 + 2\xi_2) \frac{L}{P} - 1 \right\} \quad (4.58)$$

$$f_4(P, P_a, L, \xi_1, \xi_2) = \frac{q_1}{c_1} \left((1 + 2\xi_1 + 2\xi_2) \frac{L}{P} - 1 \right) - \frac{\xi_1}{c_1} \quad (4.59)$$

$$f_5(P, P_a, L, \xi_1, \xi_2) = \frac{q_2}{c_2} \frac{P_a - P}{P} - \frac{\xi_2}{c_2} \quad (4.60)$$

Berdasarkan hasil turunan parsial pertama (4.56), (4.57), (4.58), (4.59), dan (4.60) menggunakan Formula (2.19), diperoleh matrik *Jacobian* Sistem (4.44)

$$\mathbf{J}_f(P^*, P_a^*, L^*, \xi_1^*, \xi_2^*) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_0} & 0 & \frac{(1+2\xi_1^*+2\xi_2^*)}{\tau_0} & \frac{2L^*}{\tau_0} & \frac{2L^*}{\tau_0} \\ \frac{1}{c_3} & -\frac{1}{c_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{L^*L_0q}{c(P^*)^2}(1+2\xi_1^*+2\xi_2^*) & 0 & -\frac{1}{c} + \frac{L_0q}{cP^*}(1+2\xi_1^*+2\xi_2^*) & \frac{2qL^*L_0}{c} & \frac{2qL^*L_0}{c} \\ -\frac{q_1L^*(1+2\xi_1^*+2\xi_2^*)}{c_1(P^*)^2} & 0 & \frac{q_1(1+2\xi_1^*+2\xi_2^*)}{c_1P^*} & \frac{2Lq_1}{c_1P^*} - \frac{1}{c_1} & \frac{2L^*q_1}{c_1P^*} \\ -\frac{q_2L_a^*}{c_2(P^*)^2} & \frac{q_2}{c_2P^*} & 0 & 0 & -\frac{1}{c_2} \end{bmatrix}.$$

Didapatkan matrik *Jacobian* di sekitar titik kesetimbangan $(P^*, P_a^*, L^*, \xi_1^*, \xi_2^*) = (L_0, L_0, L_0, 0, 0)$,

$$\mathbf{J}_f(1, 1, 1, 0, 0) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_0} & 0 & \frac{1}{\tau_0} & \frac{2L_0}{\tau_0} & \frac{2L_0}{\tau_0} \\ \frac{1}{c_3} & -\frac{1}{c_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{q}{c} & 0 & \frac{q-1}{c} & \frac{2qL_0^2}{c} & \frac{2qL_0^2}{c} \\ -\frac{q_1}{c_1} & 0 & \frac{q_1}{c_1L_0} & \frac{2q_1-1}{c_1} & \frac{2q_1}{c_1} \\ -\frac{q_2L_0}{c_2(L_0)^2} & \frac{q_2}{c_2L_0} & 0 & 0 & -\frac{1}{c_2} \end{bmatrix}.$$

Selanjutnya, Sistem (4.44) dilinierkan di sekitar titik kesetimbangan. Didapatkan Sistem (4.44) di sekitar titik kesetimbangan (lihat pelinieran, Formula (2.20)),

$$\begin{bmatrix} \dot{P} \\ \dot{P}_a \\ \dot{L} \\ \dot{\xi}_1 \\ \dot{\xi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_0} & 0 & \frac{1}{\tau_0} & \frac{2L_0}{\tau_0} & \frac{2L_0}{\tau_0} \\ \frac{1}{c_3} & -\frac{1}{c_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{q}{c} & 0 & \frac{q-1}{c} & \frac{2qL_0^2}{c} & \frac{2qL_0^2}{c} \\ -\frac{q_1}{c_1} & 0 & \frac{q_1}{c_1L_0} & \frac{2q_1-1}{c_1} & \frac{2q_1}{c_1} \\ -\frac{q_2L_0}{c_2(L_0)^2} & \frac{q_2}{c_2L_0} & 0 & 0 & -\frac{1}{c_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P-1 \\ P_a-1 \\ L-1 \\ \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}. \quad (4.61)$$

Diasumsikan nilai likuiditas dasar $L_0 = 1$, dengan kata lain pasar *cryptocurrency* tepat likuid.

Pasar *cryptocurrency* merupakan suatu pasar yang sangat fluktuatif, artinya *rate* perubahan harga per satuan *excess demand* $\frac{1}{\tau_0}$ kemungkinan bernilai sangat besar. Oleh karena itu, nilai τ_0 yang sangat merepresentasikan pasar *cryptocurrency* adalah bilangan riil positif kecil. Kemudian, nilai *trend-based component* ξ_1 , *value component* ξ_2 dan *liquidity component* L lebih mewakili situasi pasar sesungguhnya apabila ditinjau dalam waktu yang lebih lama. Oleh karena itu, nilai c, c_1, c_2 harus lebih besar dari τ_0 . Terlebih lagi, jika pengamatan harga *cryptocurrency* dilakukan lebih lama maka semakin baik nilai fundamental yang diperoleh. Oleh karena itu, c_3 harus lebih besar dari c, c_1, c_2 . Untuk itu, *time-scale* yang diharapkan memiliki interval $\tau_0 \ll c, c_1, c_2 \ll c_3$. Untuk menyederhanakan Sistem (4.61), ambil nilai parameter $c = c_1 = c_2 = 1$ dan nilai parameter τ_0, c_3 sebarang bilangan *real*. Didapatkan Sistem (4.61)

yang telah disederhanakan,

$$\begin{bmatrix} \dot{P} \\ \dot{P}_a \\ \dot{L} \\ \dot{\xi}_1 \\ \dot{\xi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_0} & 0 & \frac{1}{\tau_0} & \frac{2}{\tau_0} & \frac{2}{\tau_0} \\ \frac{1}{c_3} & -\frac{1}{c_3} & 0 & 0 & 0 \\ -q & 0 & q-1 & 2q & 2q \\ -q_1 & 0 & q_1 & 2q_1-1 & 2q_1 \\ -q_2 & q_2 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P-1 \\ P_a-1 \\ L-1 \\ \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}. \quad (4.62)$$

Analisis stabilitas dilakukan dengan menghitung nilai *eigen* dalam ruang parameter $(q, q_1, q_2) \in \mathbb{R}_+^3$ dan parameter $\tau_0, c_3 > 0$. Apabila λ merupakan nilai *eigen* Sistem (4.62) maka persamaan karakteristik $\det(\lambda I - \mathbf{J}_f) = 0$ dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{vmatrix} \lambda + \frac{1}{\tau_0} & 0 & -\frac{1}{\tau_0} & -\frac{2}{\tau_0} & -\frac{2}{\tau_0} \\ -\frac{1}{c_3} & \lambda + \frac{1}{c_3} & 0 & 0 & 0 \\ q & 0 & \lambda - (q-1) & -2q & -2q \\ q_1 & 0 & -q_1 & \lambda - (2q_1-1) & -2q_1 \\ q_2 & -q_2 & 0 & 0 & \lambda + 1 \end{vmatrix} = 0. \quad (4.63)$$

Berdasarkan teorema determinan matrik yang menyatakan bahwa Operasi Kolom Elementer dengan menjumlahkan atau mengurangi antar kolom, tidak mengubah nilai determinan matrik, Persamaan (4.63) ekuivalen dengan

$$\begin{vmatrix} \lambda + \frac{1}{\tau_0} & 0 & -\frac{1}{\tau_0} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{c_3} & \lambda + \frac{1}{c_3} & 0 & 0 & 0 \\ q & 0 & \lambda - (q-1) & -2\lambda - 2 & 0 \\ q_1 & 0 & -q_1 & \lambda + 1 & -\lambda - 1 \\ 0 & -q_2 & 0 & 0 & \lambda + 1 \end{vmatrix} = 0. \quad (4.64)$$

Determinan matrik pada Persamaan (4.64) didapatkan dengan metode ekspansi kofaktor, sehingga diperoleh persamaan karakteristik,

$$(\lambda + 1)^2 \left\{ \lambda^3 + \left((1 - q - 2q_1) + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{c_3} \right) \lambda^2 + \left(\frac{1 - q - 2q_1}{c_3} + \frac{2q_2}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{c_3 \tau_0} \right) \lambda + \frac{1}{c_3 \tau_0} \right\} = 0. \quad (4.65)$$

Berdasarkan teorema kestabilan sistem linier yang telah diberikan pada Bab 2.10, Sistem (2.11) stabil asimptotik apabila semua bagian *real* pada solusi Persamaan (4.65) bernilai negatif. Pada ruas kiri Persamaan (4.65), terdapat faktor $(\lambda + 1)^2$ yang dapat diartikan bahwa $\lambda = -1$ merupakan nilai *eigen* ganda. Sedangkan tiga nilai *eigen* tersisa dianalisis menggunakan kriteria *Routh-Hurwitz*.

Misalkan bahwa $K := q + 2q_1$, maka suku kedua pada ruas kiri Persamaan (4.65) menjadi,

$$\lambda^3 + \left(1 - K + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{c_3} \right) \lambda^2 + \left(\frac{1 - K}{c_3} + \frac{2q_2}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_0 c_3} \right) \lambda + \frac{1}{\tau_0 c_3} = 0. \quad (4.66)$$

Pemisalan $K := q + 2q_1$ dilakukan karena q dan q_1 adalah ukuran keinginan *trader* membeli atau menjual aset mengikuti arah tren. Apabila koefisien Persamaan (4.66) disubstitusikan ke Tabel 2.6 maka,

Tabel 4.1 Tabel *Routh-Hurwitz* Persamaan (4.66).

λ^3	1	$\frac{1-K}{c_3} + \frac{2q_2}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_0 c_3}$
λ^2	$1-K + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{c_3}$	$\frac{1}{\tau_0 c_3}$
λ^1	$b_1 = \frac{1-K}{c_3} + \frac{2q_2}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_0 c_3} - \frac{1}{\tau_0 c_3 \left(1-K + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{c_3}\right)}$	$b_2 = 0$
λ^0	$c_1 = \frac{1}{\tau_0 c_3}$	$c_2 = 0$...

Persamaan (4.66) memiliki akar-akar dengan bagian real negatif apabila kondisi *Routh-Hurwitz* berikut terpenuhi:

$$1 - K + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{c_3} > 0, \quad (4.67)$$

$$\frac{1-K}{c_3} + \frac{2q_2}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_0 c_3} > \frac{1}{\tau_0 c_3 \left(1-K + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{c_3}\right)}, \quad (4.68)$$

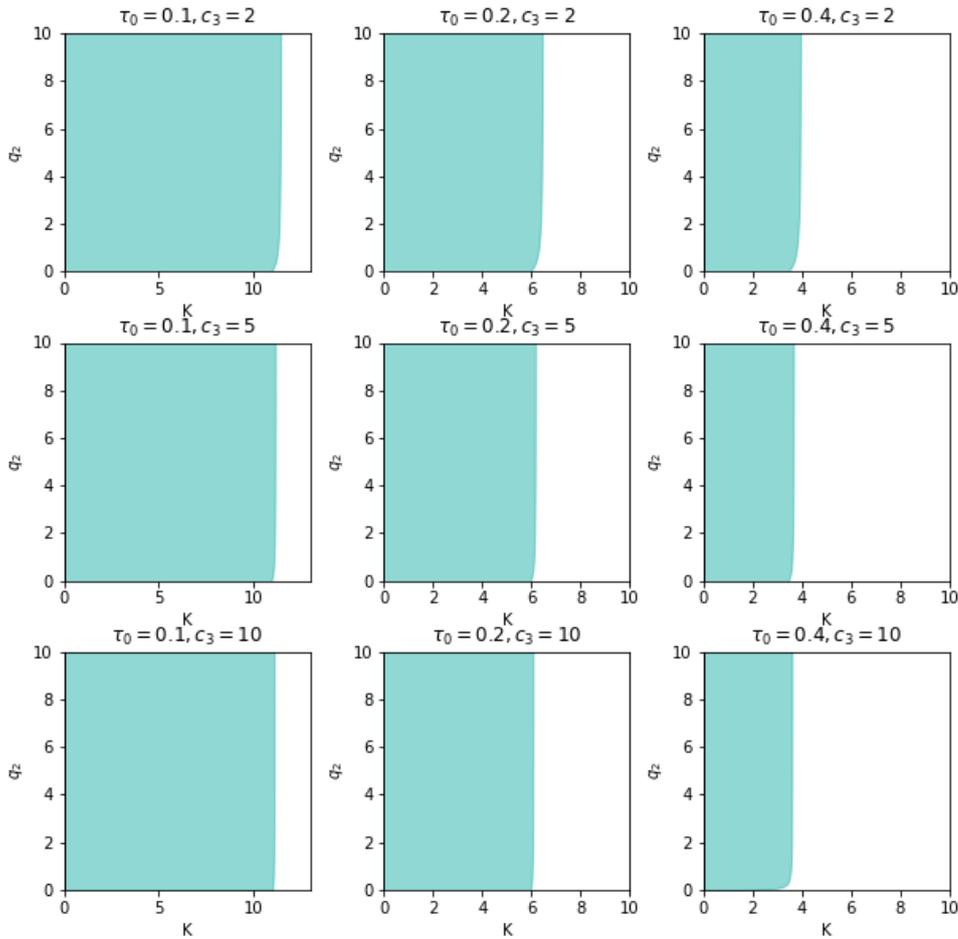
$$\frac{1}{\tau_0 c_3} > 0. \quad (4.69)$$

Pertidaksamaan (4.69) menunjukkan bahwa τ_0, c_3 bertanda sama. Berdasarkan asumsi τ_0 merupakan bilangan riil positif maka c_3 juga bernilai riil positif sehingga, Pertidaksamaan (4.69) selalu terpenuhi. Oleh karena itu, kondisi *Routh-Hurwitz* Pertidaksamaan (4.67), (4.68), dan (4.69) dapat ditulis sebagai

$$\begin{aligned} & 1 - K + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{c_3} > 0, \\ & \left(\frac{1-K}{c_3} + \frac{2q_2}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_0 c_3}\right) \left(1 - K + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{c_3}\right) > \frac{1}{\tau_0 c_3}, \end{aligned} \quad (4.70)$$

Apabila kondisi *Routh-Hurwitz* (4.70) terpenuhi maka seluruh akar-akar Persamaan (4.66) memiliki bagian *real* negatif, yang berakibat Sistem (4.44) stabil *asimptotik*.

Berikut merupakan daerah himpunan di mana pasangan nilai (K, q_2) memenuhi kondisi *Routh-Hurwitz* (4.70) untuk beragam nilai parameter τ_0, c_3 :



Gambar 4.1 Stabilitas Sistem (4.44) di bidang $K - q_2$ untuk nilai c_3 dan τ_0 yang berbeda. Daerah yang berwarna biru menunjukkan himpunan pasangan nilai (K, q_2) yang membuat Sistem (4.62) stabil *asimptotik* yang berakibat Sistem (4.44) stabil *asimptotik*.

Pada Gambar 4.1 nilai K merupakan ukuran keinginan *trader* membeli *cryptocurrency* mengikuti arah tren, sedangkan q_2 menunjukkan ukuran keinginan membeli *cryptocurrency* berdasarkan nilai fundamental. Himpunan pasangan (K, q_2) yang berada di dalam daerah berwarna biru menunjukkan pasangan nilai K dan q_2 yang membuat Sistem (4.44) *stabil asimptotik*. Sedangkan, himpunan pasangan nilai (K, q_2) yang berada di dalam daerah berwarna putih menunjukkan pasangan K dan q_2 yang membuat Sistem (4.44) tidak stabil.

Perbandingan nilai K dan q_2 menunjukkan produk *cryptocurrency* yang diminati oleh *trader*, misalkan $K > q_2$, maka *cryptocurrency* berbasis tren (contoh: *Dogecoin*) lebih diminati daripada *cryptocurrency* berbasis nilai fundamental (contoh: *Bitcoin*), begitupula sebaliknya. Sedangkan, apabila $(K, q_2) = (2, 2)$ dan $(K, q_2) = (3, 3)$ (kondisi $K = q_2$) maka jumlah *cryptocurrency* yang ditransaksikan untuk $(K, q_2) = (3, 3)$ lebih banyak daripada $(K, q_2) = (2, 2)$.

Berdasarkan kurva yang ditunjukkan oleh Gambar 4.1 didapatkan beberapa analisis mengenai kestabilan Sistem (4.44). Pertama, jika terjadi kenaikan nilai *rate* perubahan harga per unit *excess demand* τ_0 maka daerah kestabilan pada Gambar 4.1 berkurang. Hal ini terjadi karena Kondisi (4.70) menunjukkan daerah kestabilan dipengaruhi oleh besarnya $\frac{1}{\tau_0}$, dengan adanya τ_0 besar maka nilai $\frac{1}{\tau_0}$ semakin kecil. Kedua, apabila nilai c_3 semakin meningkat maka semakin lama *trader* mengamati harga *cryptocurrency*. Tampak pada Gambar 4.1 bertambahnya nilai c_3 tidak berdampak secara signifikan terhadap daerah kestabilan. Ketiga, apabila diambil nilai K

yang melampaui $1 + \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{c_3}$ maka Sistem (4.44) tidak stabil untuk semua nilai q_2 .

4.3 Analisis Kestabilan Sistem Bebas Sentimen

Untuk membuat sistem pasar *cryptocurrency* yang hanya dipengaruhi oleh likuiditas, perlu dilakukan eliminasi pada variabel sentimen $k := \xi_1 = \xi_2 = 0$ serta *perceived value* $P_a = 0$. Diperoleh sistem bebas sentimen sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\tau_0 \dot{P} &= L - P, \\ c \dot{L} &= 1 - L + q \left(\frac{L}{P} - 1 \right).\end{aligned}\quad (4.71)$$

Adapun titik kesetimbangan dari Sistem (4.71) adalah (L^*, P^*) memenuhi,

$$L^* - P^* = 0 \quad (4.72)$$

$$1 - L^* + q \left(\frac{L^*}{P^*} - 1 \right) = 0. \quad (4.73)$$

Diperoleh solusi unik dari sistem Persamaan (4.72) dan Persamaan (4.73) $(L^*, P^*) = (1, 1)$.

Selanjutnya, didapatkan matrik *Jacobian* dari Sistem (4.71) disekitar titik kesetimbangan. Untuk itu, dilakukan pemisalan pada ruas kanan Sistem (4.71)

$$f_1(P, L) = \frac{L - P}{\tau_0} \quad (4.74)$$

$$f_2(P, L) = \frac{1 - L}{c} + \frac{q}{c} \left(\frac{L}{P} - 1 \right) \quad (4.75)$$

Berdasarkan hasil turunan parsial pertama Fungsi (4.74), (4.75), diperoleh matrik *Jacobian* Sistem (4.71). Diperoleh matrik *Jacobian* Sistem (4.71),

$$\mathbf{J}_f(P^*, L^*) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_0} & \frac{1}{\tau_0} \\ -\frac{qL^*}{cP^{*2}} & -\frac{1}{c} + \frac{q}{cP^*} \end{bmatrix}.$$

Didapatkan matrik *Jacobian* di sekitar titik kesetimbangan $(P^*, L^*) = (1, 1)$,

$$\mathbf{J}_f(1, 1) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_0} & \frac{1}{\tau_0} \\ -\frac{q}{c} & \frac{q-1}{c} \end{bmatrix}.$$

Selanjutnya, Sistem (4.71) dilinierkan di sekitar titik kesetimbangan. Didapatkan Sistem (4.71) di sekitar titik kesetimbangan (lihat pelinieran, Formula (2.20)),

$$\begin{bmatrix} \dot{P} \\ \dot{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_0} & \frac{1}{\tau_0} \\ -\frac{q}{c} & \frac{q-1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P - 1 \\ L - 1 \end{bmatrix}. \quad (4.76)$$

Analisis stabilitas dilakukan dengan menghitung nilai *eigen* Sistem (4.76) untuk $q, c, \tau_0 > 0$. Apabila λ merupakan nilai *eigen* Sistem (4.76) maka persamaan karakteristik $\det(\lambda I - \mathbf{J}_f) = 0$

dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{vmatrix} \lambda + \frac{1}{\tau_0} & -\frac{1}{\tau_0} \\ \frac{q}{c} & \lambda + \left(\frac{1-q}{c}\right) \end{vmatrix} = 0. \quad (4.77)$$

Determinan matrik pada Persamaan (4.77) dihitung menggunakan metode ekspansi kofaktor, diperoleh persamaan karakteristik,

$$\lambda^2 + \left(\frac{1}{\tau_0} + \frac{1-q}{c}\right)\lambda + \frac{1}{c\tau_0} = 0. \quad (4.78)$$

Apabila koefisien Persamaan (4.78) disubstitusikan ke Tabel 2.6 maka diperoleh,

λ^2	1	$\frac{1}{c\tau_0}$
λ^1	$\frac{1}{\tau_0} + \frac{1-q}{c}$	0
λ^0	$\frac{1}{c\tau_0}$	0

Tabel 4.2 Tabel *Routh-Hurwitz* Persamaan (4.78).

Semua akar dari Persamaan (4.77) memiliki akar-akar dengan bagian *real* negatif apabila kondisi *Routh-Hurwitz* berikut terpenuhi,

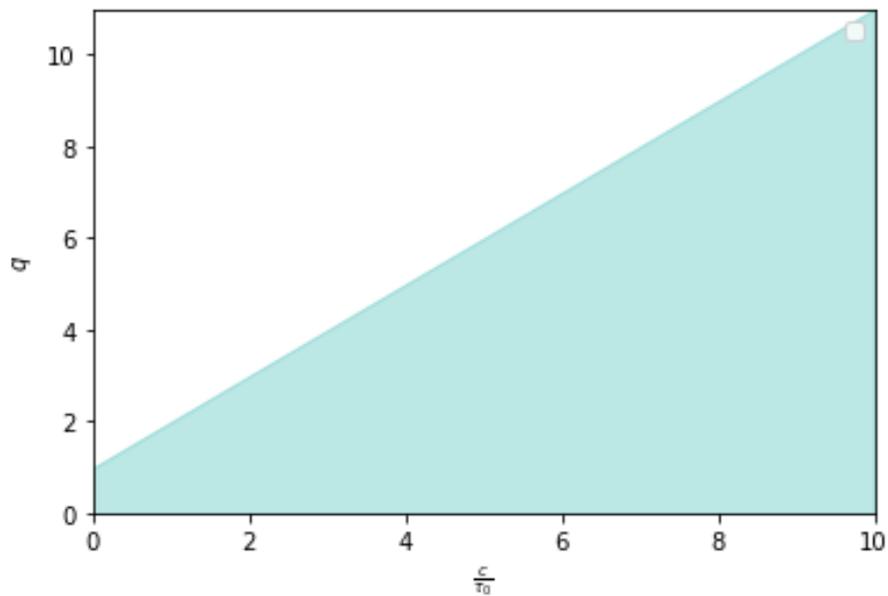
$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau_0} + \frac{1-q}{c} &> 0, \\ \frac{1}{c\tau_0} &> 0. \end{aligned} \quad (4.79)$$

Kondisi $\frac{1}{c\tau_0} > 0$ menunjukkan bahwa c dan τ_0 harus bertanda sama. Berdasarkan asumsi $c, \tau_0 > 0$, kondisi $\frac{1}{c\tau_0} > 0$ dipastikan selalu terpenuhi. Oleh karena itu, kondisi (4.79) dapat ditulis sebagai,

$$q < 1 + \frac{c}{\tau_0}. \quad (4.80)$$

Apabila kondisi *Routh-Hurwitz* (4.80) terpenuhi maka Sistem (4.71) stabil *asimptotik*.

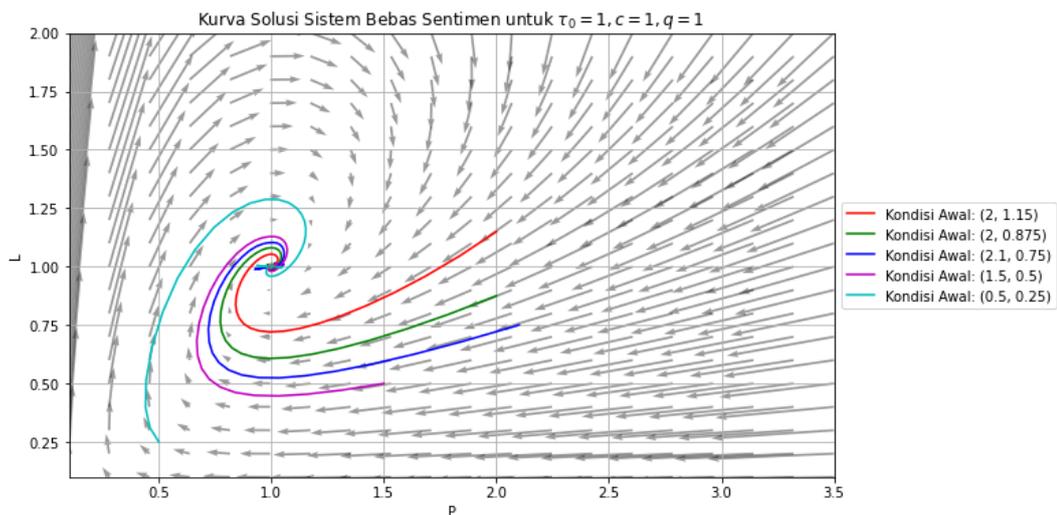
Berikut merupakan daerah himpunan pasangan $(\frac{c}{\tau_0}, q)$ memenuhi kondisi *Routh-Hurwitz* (4.79),



Gambar 4.2 Stabilitas Sistem (4.71) yang merupakan Sistem (4.44) yang disederhanakan dengan mengasumsikan bahwa tidak terdapat sentimen dan nilai fundamental didalam pasar *cryptocurrency*. Sistem (4.71) stabil *asimptotik* untuk himpunan pasangan nilai $(\frac{c}{\tau_0}, q)$ didalam daerah berwarna biru.

Berdasarkan Gambar 4.2, apabila ukuran keinginan *trader* membeli aset berdasarkan arah tren q semakin besar, maka daerah kestabilan Sistem (4.71) semakin kecil. Apabila harga *cryptocurrency* semakin mendatar yang ditandai dengan nilai τ_0 semakin kecil, maka sistem (4.71) daerah kestabilan Sistem (4.71) semakin besar.

Berikut merupakan *phase portrait* beserta kurva solusi Sistem (4.44) untuk nilai $c = \tau_0 = q = 1$ dengan berbagai kondisi awal :

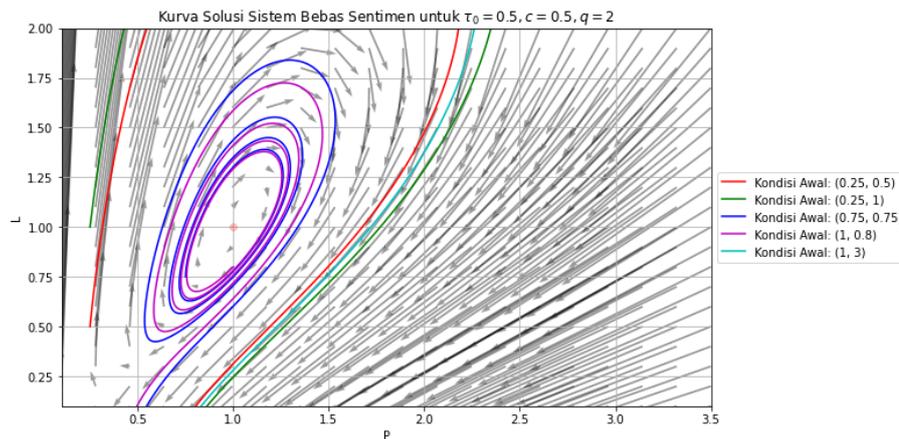


Gambar 4.3 Kurva solusi Sistem (4.71) untuk nilai $c = \tau_0 = q = 1$ dengan berbagai kondisi awal.

Phase portrait pada Gambar 4.3 menunjukkan bahwa Sistem (4.71) dengan parameter di

dalam daerah berwarna biru Gambar 4.3 terbukti stabil *asimtotik*. Tampak bahwa untuk $t \rightarrow \infty$ Sistem (4.71) mencapai titik kesetimbangan $(P^*, L^*) = (1, 1)$. Dapat diartikan bahwa pasar *cryptocurrency* akan memiliki likuiditas 1 dan harga aset sebesar 1 *dollar* ketika $t \rightarrow \infty$. Dalam perspektif ekonomi, apabila *trader* tidak menekankan *tren* pembelian aset, *cryptocurrency* berharga konstan suatu saat nanti.

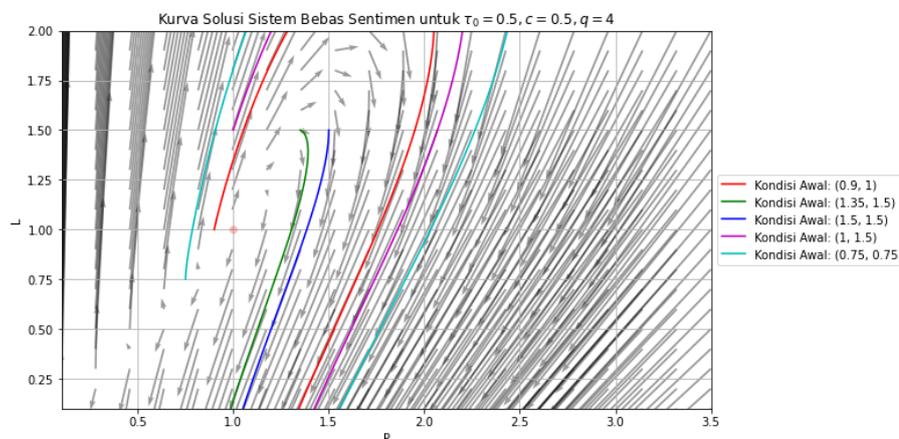
Berikut merupakan *phase portrait* beserta kurva solusi Sistem (4.71) untuk nilai $c = \tau_0 = 0.5, q = 2$ dengan berbagai kondisi awal :



Gambar 4.4 Kurva solusi Sistem (4.71) untuk nilai $c = \tau_0 = 0.5, q = 2$ dengan berbagai kondisi awal.

Phase portrait pada Gambar 4.3 menunjukkan bahwa Sistem (4.71) dengan parameter di dalam daerah berwarna biru Gambar 4.3 terbukti stabil. Tampak bahwa untuk $t \rightarrow \infty$ Sistem (4.71) hanya mengitari titik kesetimbangan $(P^*, L^*) = (1, 1)$. Dapat diartikan bahwa pasar *cryptocurrency* tidak akan pernah mencapai likuiditas 1 dan harga aset sebesar 1 *dollar* ketika $t \rightarrow \infty$. Dalam perspektif ekonomi, apabila *trader* cenderung menekankan *tren* pembelian aset, *cryptocurrency* tidak pernah berharga konstan.

Berikut merupakan *phase portrait* beserta kurva solusi Sistem (4.44) untuk nilai $c = \tau_0 = 0.5, q = 4$ dengan berbagai kondisi awal :



Gambar 4.5 Kurva solusi Sistem (4.71) untuk nilai $c = \tau_0 = 0.5, q = 4$ dengan berbagai kondisi awal.

Phase portrait pada Gambar 4.5 menunjukkan bahwa Sistem (4.71) dengan parameter di dalam daerah berwarna biru Gambar 4.3 terbukti tidak stabil. Tampak bahwa untuk $t \rightarrow \infty$ Sistem (4.71) menjauhi titik kesetimbangan $(P^*, L^*) = (1, 1)$. Dapat diartikan bahwa pasar *cryptocurrency* tidak akan pernah mencapai likuiditas 1 dan harga aset sebesar 1 *dollar* ketika $t \rightarrow \infty$. Dalam perspektif ekonomi, apabila *trader* cenderung terlalu menekankan *tren* pembelian aset, *cryptocurrency* tidak pernah berharga konstan dan cenderung fluktuatif.

4.4 Analisis Kestabilan Sistem Bebas *Value Component*

Untuk membuat sistem pasar *cryptocurrency* yang tidak dipengaruhi oleh *value component*, perlu dilakukan eliminasi pada variabel $\xi_2 = 0$ serta *perceived value* $P_a = 0$. Diperoleh sistem bebas *value component* sebagai berikut,

$$\begin{aligned}\tau_0 \dot{P} &= (1 + 2\xi_1)L - P \\ c\dot{L} &= 1 - L + q \left((1 + 2\xi_1) \frac{L}{P} - 1 \right) \\ c_1 \dot{\xi}_1 &= q_1 \left((1 + 2\xi_1) \frac{L}{P} - 1 \right) - \xi_1.\end{aligned}\tag{4.81}$$

Adapun titik kesetimbangan dari Sistem (4.81) adalah (P^*, L^*, ξ_1^*) memenuhi,

$$(1 + 2\xi_1^*)L^* - P^* = 0\tag{4.82}$$

$$q_1 \left((1 + 2\xi_1^*) \frac{L^*}{P^*} - 1 \right) - \xi_1^* = 0\tag{4.83}$$

$$1 - L^* + q \left((1 + 2\xi_1^*) \frac{L^*}{P^*} - 1 \right) = 0\tag{4.84}$$

Diperoleh solusi unik dari Persamaan (4.82), Persamaan (4.83), dan Persamaan (4.84) $(P^*, L^*, \xi_1^*) = (1, 1, 0)$.

Selanjutnya, didapatkan matrik *Jacobian* dari Sistem (4.81) di sekitar titik kesetimbangan. Untuk itu, dilakukan pemisalan pada ruas kanan Sistem (4.81)

$$f_1(P, L, \xi_1) = \frac{(1 + 2\xi_1)L - P}{\tau_0},\tag{4.85}$$

$$f_2(P, L, \xi_1) = \frac{1 - L}{c} + \frac{q}{c} \left((1 + 2\xi_1) \frac{L}{P} - 1 \right),\tag{4.86}$$

$$f_3(P, L, \xi_1) = \frac{q_1}{c_1} \left((1 + 2\xi_1) \frac{L}{P} - 1 \right) - \frac{\xi_1}{c_1}.\tag{4.87}$$

Berdasarkan hasil turunan parsial pertama Fungsi (4.85), (4.86), dan (4.87), diperoleh matrik *Jacobian* Sistem (4.81)

$$\mathbf{J}_f(P^*, L^*, \xi_1^*) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_0} & \frac{1+2\xi_1^*}{\tau_0} & \frac{2L^*}{\tau_0} \\ -\frac{q(1+2\xi_1^*)L^*}{c(P^*)^2} & -\frac{1}{c} + \frac{q(1+2\xi_1^*)}{cP^*} & \frac{2qL^*}{cP^*} \\ -\frac{q_1(1+2\xi_1^*)L^*}{c_1(P^*)^2} & \frac{q_1(1+2\xi_1^*)}{c_1P^*} & \frac{2q_1L^*}{c_1P^*} - \frac{1}{c_1} \end{bmatrix}$$

Didapatkan matrik *Jacobian* di sekitar titik kesetimbangan $(P^*, L^*, \xi_1^*) = (1, 1, 0)$,

$$\mathbf{J}_f(1, 1, 0) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_0} & \frac{1}{\tau_0} & \frac{2}{\tau_0} \\ -\frac{q}{c} & \frac{q-1}{c} & \frac{2q}{c} \\ -\frac{q_1}{c_1} & \frac{q_1}{c_1} & \frac{2q_1-1}{c_1} \end{bmatrix}$$

Selanjutnya, Sistem (4.81) di sekitar titik kesetimbangan, (lihat pelinieran, Formula (2.20))

$$\begin{bmatrix} \dot{P} \\ \dot{L} \\ \dot{\xi}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_0} & \frac{1}{\tau_0} & \frac{2}{\tau_0} \\ -\frac{q}{c} & \frac{q-1}{c} & \frac{2q}{c} \\ -\frac{q_1}{c_1} & \frac{q_1}{c_1} & \frac{2q_1-1}{c_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P-1 \\ L-1 \\ \xi_1 \end{bmatrix}. \quad (4.88)$$

Analisis stabilitas dilakukan dengan menghitung nilai *eigen* Sistem (4.88) untuk $q > 0, q_1 > 0, c = c_1 = 1$. Apabila λ merupakan nilai *eigen* Sistem (4.88) maka persamaan karakteristik $\det(\lambda I - \mathbf{J}_f) = 0$

$$\begin{vmatrix} \lambda + \frac{1}{\tau_0} & -\frac{1}{\tau_0} & -\frac{2}{\tau_0} \\ q & \lambda - (q-1) & -2q \\ q_1 & -q_1 & \lambda - 2q_1 + 1 \end{vmatrix} = 0. \quad (4.89)$$

Deteminan matrik pada Persamaan (4.89) dihitung menggunakan metode ekspansi kofaktor, sehingga diperoleh persamaan karakteristik,

$$\lambda^3 + \left(2 - q - 2q_1 + \frac{1}{\tau_0}\right) \lambda^2 + \left(1 - q - 2q_1 + \frac{2}{\tau_0}\right) \lambda + \frac{1}{\tau_0} = 0, \quad (4.90)$$

Persamaan (4.90) dapat dituliskan sebagai,

$$(\lambda + 1) \left(\lambda^2 + \left(1 - q - 2q_1 + \frac{1}{\tau_0}\right) \lambda + \frac{1}{\tau_0} \right) = 0. \quad (4.91)$$

Diketahui bahwa salah satu nilai *eigen* dari Persamaan (4.91) adalah $\lambda_1 = -1$. Oleh karena itu, agar (4.90) seluruh nya memiliki akar dengan bagian bagian real negatif maka

$$\lambda^2 + \left(1 - q - 2q_1 + \frac{1}{\tau_0}\right) \lambda + \frac{1}{\tau_0} = 0 \quad (4.92)$$

memiliki kedua akar dengan bagian real negatif. Berdasarkan formula jumlah akar-akar persamaan kuadrat, Persamaan (4.92) memiliki semua akar dengan bagian real negatif apabila,

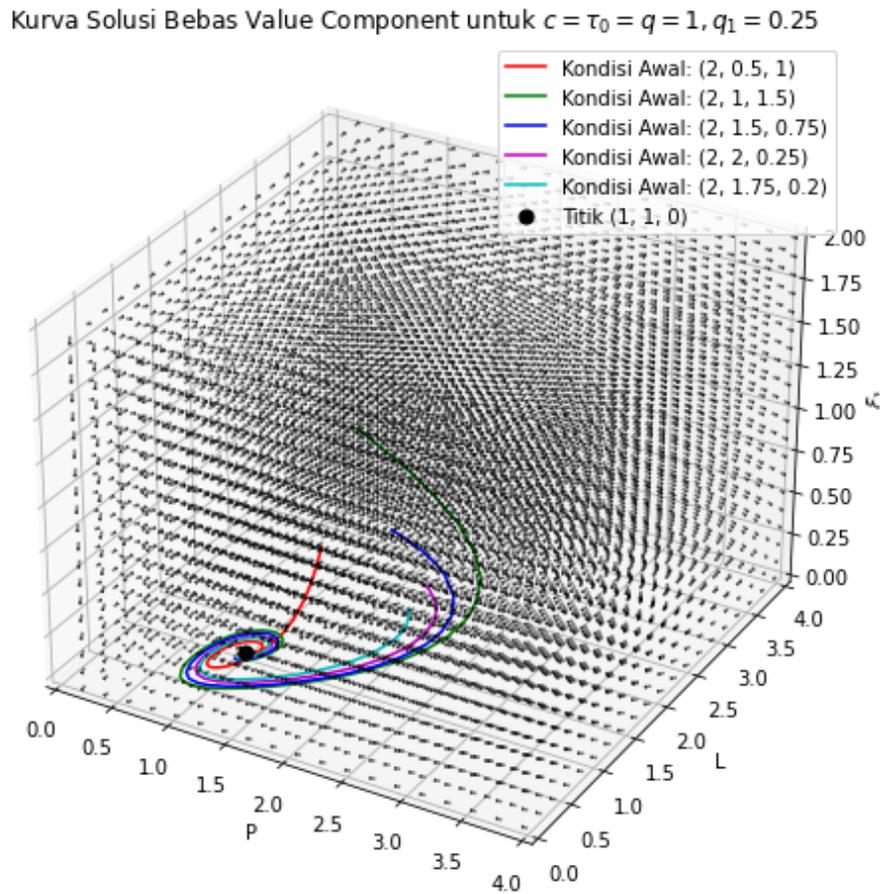
$$q + 2q_1 < 1 + \frac{1}{\tau_0}. \quad (4.93)$$

Apabila kondisi (4.93) terpenuhi maka Sistem (4.81) stabil *asimtotik*.

Kondisi (4.93) dapat disederhanakan apabila diasumsikan harga *cryptocurrency* sangat fluktuatif, yang ditandai dengan nilai $\tau_0 \rightarrow \infty$ sehingga didapat $\frac{1}{\tau_0} \rightarrow 0$. Oleh karena itu, apabila $q + 2q_1 < 1$ maka Sistem (4.81) stabil *asimtotik*, dan sedangkan apabila $q + 2q_1 > 1$ maka Sistem (4.81) tidak stabil. Dalam perspektif ekonomi, nilai $q + 2q_1 < 1$ menunjukkan bahwa *trader* tidak menekankan tren dalam pembelian aset, sedangkan nilai $q + 2q_1 > 1$ menunjukkan bahwa *trader* menekankan tren dalam pembelian aset.

Berikut merupakan *phase portrait* beserta kurva solusi Sistem (4.81) untuk nilai $c = \tau_0 =$

$q = 1, q_1 = 0.25$, dengan berbagai kondisi awal :

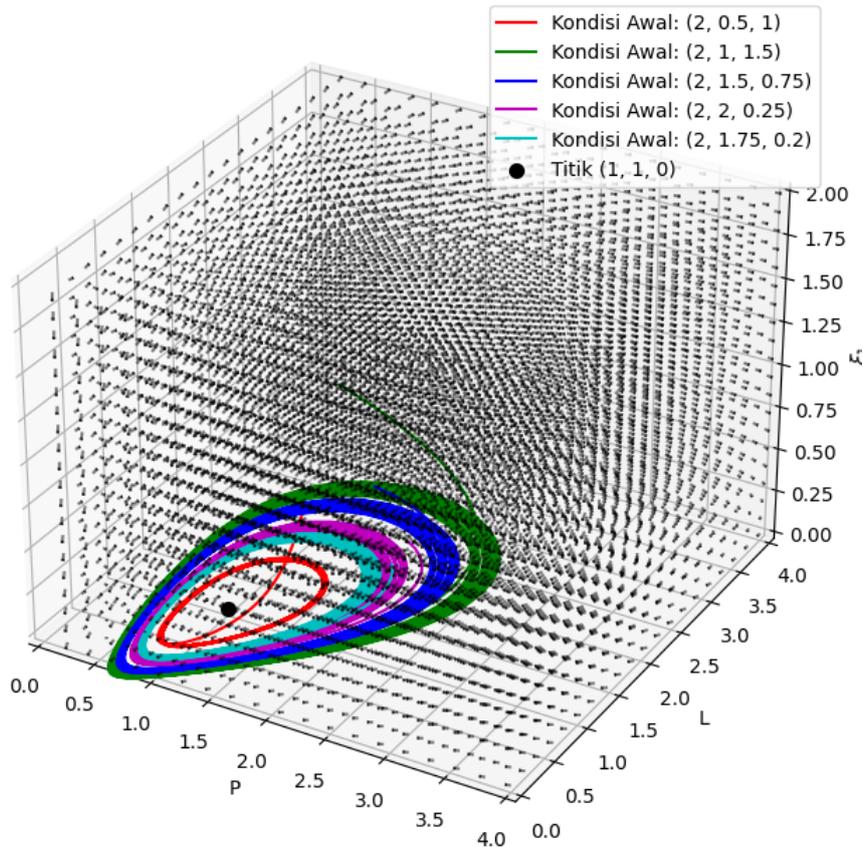


Gambar 4.6 Kurva solusi Sistem (4.81) untuk nilai $c = \tau_0 = q = 1, q_1 = 0.25$ dengan berbagai kondisi awal.

Phase portrait pada Gambar 4.6 menunjukkan bahwa Sistem (4.81) dengan parameter memenuhi Kondisi (4.93) terbukti stabil *asimptotik*. Tampak bahwa, ketika $t \rightarrow \infty$ Sistem (4.93) mencapai titik kesetimbangan $(P^*, L^*, \xi_1^*) = (1, 1, 0)$. Dapat diartikan bahwa pasar *cryptocurrency* memiliki likuiditas 1 dan harga aset sebesar 1 *dollar* dan nilai *tren based component* 0 ketika $t \rightarrow \infty$. Dalam perspektif ekonomi, apabila *trader* tidak menekankan tren pada pembelian aset maka *cryptocurrency* berharga konstan suatu saat nanti.

Berikut merupakan *phase portrait* beserta kurva solusi Sistem (4.81) untuk nilai $c = \tau_0 = q = 1, q_1 = 0.5$, dengan berbagai kondisi awal :

Kurva Solusi Bebas Value Component untuk $c = \tau_0 = q = 1, q_1 = 0.5$

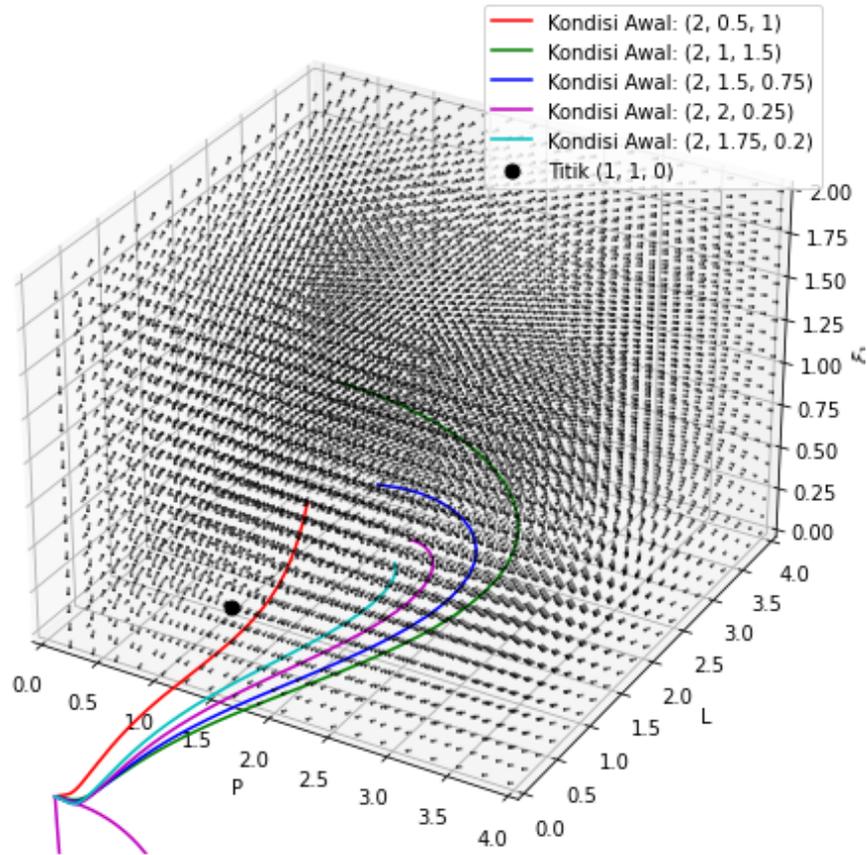


Gambar 4.7 Kurva solusi Sistem (4.81) untuk nilai $c = \tau_0 = q, q_1 = 0.5$ dengan berbagai kondisi awal.

Phase portrait pada Gambar 4.6 menunjukkan bahwa Sistem (4.81) dengan parameter berada pada batas Kondisi (4.93) terbukti stabil. Tampak bahwa, ketika $t \rightarrow \infty$ Sistem (4.81) mengitari titik kesetimbangan $(P^*, L^*, \xi_1^*) = (1, 1, 0)$. Dapat diartikan bahwa pasar *cryptocurrency* tidak pernah memiliki likuiditas 1 dan harga aset sebesar 1 *dollar* dan nilai *tren based component* 0 ketika $t \rightarrow \infty$. Dalam perspektif ekonomi, apabila *trader* menekankan tren pada pembelian aset maka *cryptocurrency* tidak pernah berharga konstan.

Berikut merupakan *phase portrait* beserta kurva solusi Sistem (4.81) untuk nilai $c = \tau_0 = q = q_1 = 1$, dengan berbagai kondisi awal :

Kurva Solusi Bebas Value Component untuk $c = \tau_0 = q = q_1 = 1$



Gambar 4.8 Kurva solusi Sistem (4.81) untuk nilai $c = \tau_0 = q = q_1 = 1$ dengan berbagai kondisi awal.

Phase portrait pada Gambar 4.6 menunjukkan bahwa Sistem (4.81) dengan parameter yang tidak memenuhi Kondisi (4.93) terbukti tidak stabil. Tampak bahwa, ketika $t \rightarrow \infty$ Sistem (4.93) menjauhi titik kesetimbangan $(P^*, L^*, \xi_1^*) = (1, 1, 0)$. Dapat diartikan bahwa pasar *cryptocurrency* tidak pernah memiliki likuiditas 1 dan harga aset sebesar 1 dan nilai *tren based component* 0 dollar ketika $t \rightarrow \infty$. Dalam perspektif ekonomi, apabila *trader* terlalu menekankan tren pada pembelian aset maka *cryptocurrency* tidak pernah berharga konstan dan cenderung fluktuatif.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan yang telah dibahas pada bab IV, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Model sistem dinamik pasar *cryptocurrency* diperoleh dengan menggabungkan *asset flow equations* beserta model matematika yang merepresentasikan perilaku *trader* antara lain: perilaku membeli atau menjual aset mengikuti arah tren (*trend-based component*), perilaku membeli atau menjual aset berdasarkan nilai fundamental (*value component*), beserta model matematika yang merepresentasikan likuiditas (*liquidity-component*).
2. Perilaku *trader* untuk membeli atau menjual aset mengikuti arah tren adalah faktor yang paling mempengaruhi fluktuasi harga *cryptocurrency* daripada faktor-faktor lainnya. Hal ini ditunjukkan oleh nilai parameter yang merepresentasikan ukuran keinginan *trader* membeli atau menjual aset mengikuti arah tren, sangat menentukan kestabilan sistem dinamik pasar *cryptocurrency*.

5.2 Saran

Saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah,

1. Penambahan variabel kontrol sistem dinamik pasar *cryptocurrency* sangat menarik untuk diteliti lebih lanjut.
2. Analisis bifurkasi untuk sistem dinamik pasar *cryptocurrency* sebaiknya dilakukan untuk mendapatkan informasi yang lebih mendetail.
3. Penelitian berikutnya perlu dilakukan validasi dengan data harga *cryptocurrency* sesungguhnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Alula. (2022, Nov). *Investasi dan miliki bisnis menguntungkan mulai dari 1 jutaan di landx*. LandX. Retrieved from <https://landx.id/blog/nilai-intrinsik-fungsi-jenis-cara-menghitung-nilai-intrinsik-saham/>
- Anton, H., Bivens, I., & Davis, S. (2012). *Calculus early transcendentals single variable*. Wiley. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=hnENJfL79s8C>
- Best, R. (2022). *Daily bitcoin (btc) market cap history up until november 14, 2022*. Retrieved 2023-05-25, from <https://www.statista.com/statistics/377382/bitcoin-market-capitalization/>
- Boyce, W. E., & Dprima, R. C. (2009). *Elementary differential equations and boundary value problems*. Wiley.
- Caginalp, C. (2019, 08). A dynamical systems approach to cryptocurrency stability. *AIMS Mathematics*, 4, 1065-1077. doi: 10.3934/math.2019.4.1065
- Caginalp, C., & Caginalp, G. (2018). Valuation, liquidity price, and stability of cryptocurrencies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(6), 1131-1134. Retrieved from <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1722031115> doi: 10.1073/pnas.1722031115
- Caginalp, C., & Caginalp, G. (2020). Derivation of non-classical stochastic price dynamics equations. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 560, 125118. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437120305859> doi: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.125118>
- Caginalp, G., & Balenovich, D. (1999). Asset flow and momentum: deterministic and stochastic equations. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 357(1758), 2119-2133. Retrieved from <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rsta.1999.0421> doi: 10.1098/rsta.1999.0421
- CoinMarketCap. (2017). *Historical data of bitcoin*. Retrieved 2023-05-25, from <https://coinmarketcap.com/currencies/bitcoin/historical-data/>
- Danial, K. (2019). *Cryptocurrency investing for dummies*. John Wiley Sons, Inc.
- Goode, S. W. (2000). *An introduction to differential equations and linear algebra*. Prentice Hall.
- Jordan, D. W., & Smith, P. (2012). *Nonlinear ordinary differential equations: Problems and solutions a sourcebook for scientists and engineers*. Oxford Univ. Press.
- Lieure, A. (2018). *Herd behaviour and information uncertainty: Insights from the cryptocurrency market* (Unpublished doctoral dissertation).
- Lutfiana, A., Danial, R. D. M., & Jhoansyah, D. (2019, 07). Analisis penilaian harga wajar saham dan keputusan investasi secara fundamental dengan menggunakan metode price earning ratio (studi keuangan pada sektor industri barang konsumsi yang terdaftar di bej). *Jurnal Ekonomi dan Bisnis*, 20, 1. doi: 10.30659/ekobis.20.2.1-10
- Nagle, R. K., Saff, E. B., & Snider, A. D. (2018). *Fundamentals of differential equations*. Pearson.
- Nakamoto, S. (2009, May). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. Retrieved from <http://www.bitcoin.org/bitcoin.pdf>

- Ross, S. L. (1984). *Differential equations* (3rd ed.). Wiley.
- SEC. (2008, July). *Liquidity(or marketability)*. U.S. Securities and Exchange Commissions Office of Investor Education and Advocacy. Retrieved from <https://www.investor.gov/introduction-investing/investing-basics/glossary/liquidity-or-marketability>
- Subiono. (2013). *Sistem linear dan kontrol optimal*. Jurusan Matematika Institut Speuluh Nopember.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penyelesaian penulisan tugas akhir ini tidak lepas dari orang-orang terdekat penulis yang telah mendukung dan memotivasi penulis. Oleh sebab itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak/Ibu dosen pengajar yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu, yang telah memberikan ilmu, pengalaman dan doa kepada penulis, serta segenap Karyawan, Tendik dan keluarga besar Departemen Matematika Institut Teknologi Sepuluh Nopember atas dukungan dan bantuannya.

Penulis juga mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak untuk penyempurnaan isi tugas akhir ini. Akhir kata, semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi semua pihak yang bersangkutan.

Surabaya, 17 Juli 2023

Felix Lyanto Setiawan

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Felix Lyanto Setiawan, dengan nama panggilan Felix, lahir di kota Surabaya pada tanggal 11 Desember 2001. Adapun jenjang pendidikan penulis dimulai dari TK.Dharma Mulya Surabaya (2005-2007), SD Katolik. Santa Maria Regina Surabaya (2007-2013), SMP Katolik Etika Darma (2013-2016), SMA Katolik Santo Carolus Surabaya (2016-2017). Selanjutnya menempuh studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Saat ini, penulis merupakan mahasiswa Departemen Matematika Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya semester 8 jenjang S1 dan sekaligus mahasiswa Magister Matematika ITS skema *Fast-track* S2 Semester 2.

Di Departemen Matematika penulis mengambil bidang matematika terapan dengan peminatan lab Matematika Industri dan Keuangan. Penulis tertarik di bidang penelitian penerapan matematika di bidang finansial, terutama penetapan harga kontrak produk keuangan turunan seperti kontrak opsi, obligasi, *stock-loan*, asuransi, *weather derivative*, *carbon derivative* dan masih banyak lagi. Penulis selain aktif di bidang perkuliahan, juga aktif di bidang kompetisi matematika dan organisasi. Di bidang organisasi penulis pernah menjabat di Himpunan Mahasiswa Matematika ITS (HIMATIKA ITS) sebagai *Staff of Applied Science Department* (2021-2022). Di bidang kompetisi sangat aktif dalam mengikuti kompetisi matematika tahunan yang diadakan oleh berbagai perguruan tinggi. Adapun prestasi terbaik yang pernah diraih oleh penulis adalah Juara III *Calculus Cup XII* Universitas Negeri Jakarta (2021). Selain aktif mengikuti kompetisi matematika, penulis juga aktif menjadi *volunteer* dalam *Big Event* OMITS, penulis menjadi anggota dari *Question Maker* (QM) untuk kompetisi *MISSION 5.0* (2021) dan *MISSION 6.0* (2022).

Kritik dan saran serta informasi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini dapat ditujukan ke penulis melalui email: felixlyanto@gmail.com.