

## DESAIN DAN SIMULASI NUMERIK SINKRONISASI *UNIDIRECTIONAL* SIRKUIT JERK DAN APLIKASINYA UNTUK SISTEM KEAMANAN KOMUNIKASI

Mada Sanjaya W.S.<sup>1,2</sup>, Aceng Sambas<sup>1</sup>, Mustafa Mamat<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Bolabot Techno Robotic Institute, CV. Sanjaya Star Group, Bandung  
Bandung, INDONESIA

<sup>2</sup>Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi  
Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Djati  
Bandung, INDONESIA

<sup>3</sup>Faculty of Science and Technology, Universiti Malaysia Terengganu,  
21030 Kuala Terengganu, MALAYSIA

### *Abstrak*

Sistem chaos mempunyai karakteristik ketergantungan yang sensitif pada kondisi awal, mirip dengan perilaku acak, dan memiliki *strange attractor* yang unik. Chaos mempunyai potensi yang baik untuk dijadikan sistem keamanan komunikasi. Dalam makalah ini, kami menunjukkan beberapa fenomena yang menarik dari tiga orde sirkuit Jerk dengan *modulus* non-linier. Perilaku chaos ini berfungsi sebagai variabel parameter kontrol. Penelitian awal dalam makalah ini adalah menganalisis diagram fase, diagram bifurkasi dan peta Poincare. Analisis sinkronisasi dalam kasus sinkronisasi *unidirectional* antara dua sistem chaos yang identik juga telah disajikan. Berdasarkan hasil sinkronisasi chaos tersebut, akhirnya efektivitas skema sinkronisasi *unidirectional* antara dua sistem Jerk yang identik dalam sistem keamanan komunikasi disajikan secara rinci dan menunjukkan potensi untuk dijadikan sebagai masking data. Integrasi fisika teoritis, simulasi numerik dengan menggunakan MATLAB serta implementasi simulasi sirkuit dengan menggunakan MultiSIM telah dilakukan dalam makalah ini.

**Kata Kunci :** Sirkuit Jerk, Sinkronisasi Unidirectional, Sistem Keamanan Komunikasi

### 1. Pendahuluan

Chaos digunakan untuk menggambarkan perilaku sistem dinamika non linier tertentu, yaitu, sistem variabel keadaan yang kontinu dengan waktu

menunjukkan dinamika yang kompleks yang sangat sensitif pada kondisi awal. Hasil dari sensitivitas ini, memanifestasikan pertumbuhan gangguan eksponensial pada kondisi awal dan perilaku chaos yang

tampak acak [1]. Perilaku chaos telah ditemukan dalam bidang fisika [2], kimia [3], biologi [4], robot [5], bit generator [6], psikologi [7], ekologi [8-9] dan ekonomi [10].

Selama dekade terakhir, sinkronisasi sistem chaos telah dieksplorasi sangat intensif oleh banyak peneliti dengan menggunakan sirkuit elektronik, seperti sirkuit Rössler [11], sirkuit Duffing [12], sirkuit Chua [13], sirkuit Double Bell [14], Sistem jaringan saraf FitzHugh-Nagumo [15] dan Model jaringan saraf Hindmarsh-Rose [16]. Untuk selanjutnya, motivasi utama potensi aplikasi praktis dalam sistem keamanan komunikasi [17-18]. Pecora dan Carroll pertama menunjukkan bagaimana sistem chaos dapat disinkronkan, menggunakan sirkuit elektronik digabungkan searah dengan subsistem terdiri dari komponen sistem induk [19].

Inovasi ini memberikan perspektif baru dalam dinamika chaos dan terinspirasi dari banyak studi tentang sinkronisasi pada sistem chaos. Cuomo dan Oppenheim

mengeksplorasi hasil penelitiannya dengan menunjukkan bagaimana sistem chaos disinkronkan dan digunakan dalam skema untuk sistem keamanan komunikasi [20].

Sinkronisasi antara sinyal chaos telah menerima banyak perhatian dan menyebabkan berbagai aplikasi komunikasi. Banyak peneliti menunjukkan, menggunakan simulasi, chaos yang dapat disinkronkan dan diterapkan untuk sistem keamanan komunikasi. Seperti skema komunikasi serat optik menggunakan chaos [21], komunikasi yang aman menggunakan *cipher* chaos [22] dan komunikasi dengan chaos laser [23].

Rencana makalah adalah sebagai berikut. Pada bagian 2, rincian simulasi yang diusulkan sirkuit Jerk *autonomous* menggunakan MATLAB 2010 dan MultiSIM 10,0, disajikan. Dalam Bagian 3, metode sinkronisasi *unidirectional* diterapkan untuk menyinkronkan dua sistem sirkuit Jerk *autonomous* yang identik. Skema sistem keamanan

komunikasi dengan menggunakan teknik sinkronisasi tersebut di atas disajikan dalam Bab 4. Akhirnya, dalam Bagian 5, kesimpulan yang dihasilkan.

## 2. Sirkuit Jerk

Sprott menemukan bentuk fungsional dari sistem dinamik tiga dimensi yang memperlihatkan fenomena chaos. Persamaan Jerk memiliki fungsi non linier sederhana yang dapat diimplementasikan dengan sirkuit elektronik *autonomous*. Dalam karya ini, sirkuit Jerk, yang pertama kali disajikan oleh Sprott pada tahun 2000 [24], digunakan. Ini adalah sistem non linier *autonomous* tiga-dimensi yang dijelaskan oleh sistem persamaan diferensial biasa berikut:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= z \\ \dot{z} &= -az - by + |x| - 1 \end{aligned} \right\}$$

(1)

Persamaan ini hanya memiliki satu istilah non linier dalam bentuk nilai mutlak dari variabel  $x$ . Parameter dan kondisi awal

dari sistem Jerk (1) terpilih sebagai berikut:  $a = 0.6$  dan  $b = 1$  dan  $(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0)$ . Sehingga sistem menunjukkan perilaku chaos yang diharapkan. Sistem Jerk memiliki dua titik ekuilibrium  $(1, 0, 0)$  dan  $(-1, 0, 0)$ .

Untuk titik ekuilibrium  $(1, 0, 0)$ , matriks Jacobi menjadi:

$$J_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & -0.9 \end{pmatrix}$$

(2)

Nilai-nilai eigen diperoleh dengan memecahkan persamaan karakteristik,  $\det [J_1 - \lambda] = 0$  yaitu:

$$\lambda^3 + 0.9\lambda^2 + \lambda + 1 = 0$$

(3)

Maka diperoleh nilai eigen sebagai berikut:  $\lambda_1 = -0.835551$ ,  $\lambda_2 = 0.117776 - 1.08763 i$ ,  $\lambda_3 = 0.117776 + 1.08763 i$  untuk  $a = 0.6$ ,  $b=1$ . Untuk titik ekuilibrium  $(-1, 0, 0)$ , matriks Jacobi menjadi:

$$J_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -0.9 \end{pmatrix}$$

(4)

Nilai-nilai eigen diperoleh dengan memecahkan persamaan karakteristik, det  $[J_2 - \lambda] = 0$  yaitu:

$$\lambda^3 + 0.9\lambda^2 + \lambda - 1 = 0$$

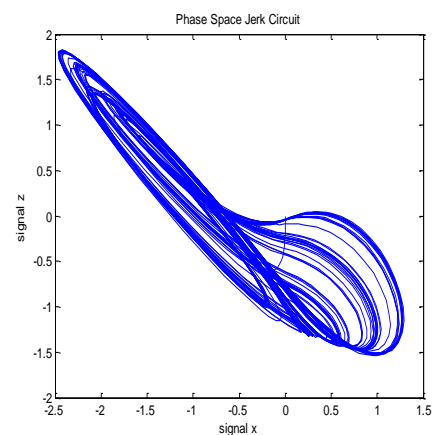
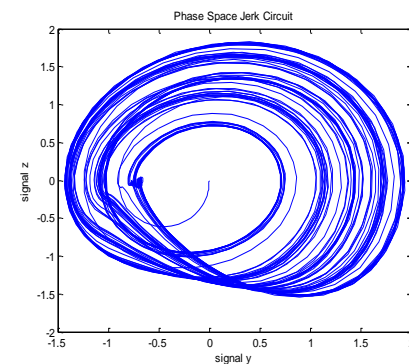
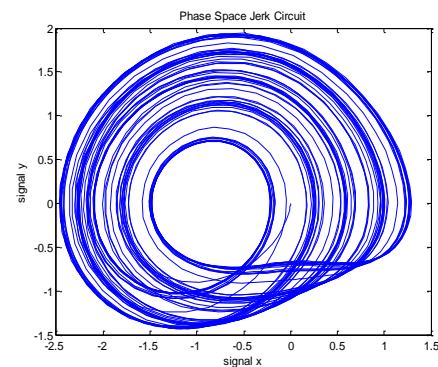
(5)

Maka diperoleh nilai eigen sebagai berikut:  $\lambda_1 = 0.588458$ ,  $\lambda_2 = -0.594229 - 1.16028i$ ,  $\lambda_3 = -0.594229 + 1.16028i$  untuk  $a = 0.6$ ,  $b = 1$ . Nilai eigen diatas menunjukkan bahwa sistem ini memiliki perilaku spiral tidak stabil. Dalam kasus ini, fenomena chaos telah ditunjukkan.

## 2.1 Simulasi Numerik Menggunakan MATLAB 2010

Pada bagian ini, simulasi numerik dilakukan dengan menggunakan MATLAB 2010. metode Runge-Kutta orde 4 digunakan untuk memecahkan sistem persamaan diferensial (1). Gambar 1 (a)-(c) menunjukkan proyeksi orbit ruang fase pada masing-masing bidang  $xy$ , bidang  $y-z$  dan bidang  $x-z$ . Seperti yang ditunjukkan, untuk set parameter yang dipilih dan

kondisi awal, sistem Jerk menyajikan *attractor* chaos jenis Rössler. Juga, hal ini diketahui dari teori non linier, bahwa spektrum Lyapunov eksponen memberikan informasi yang berguna tambahan tentang perilaku sistem.



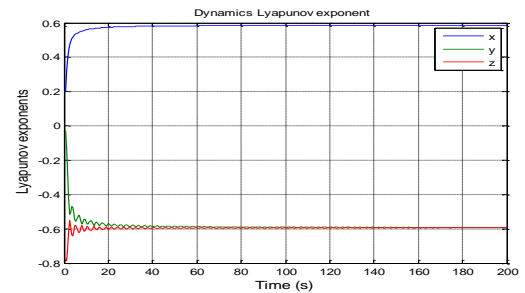
Gambar 1. Hasil simulasi numerik menggunakan MATLAB 2010, untuk  $a=0,6$  dan  $b = 1$ :

(a) bidang  $xy$ , (b) bidang  $yz$ , (c) bidang  $xz$ .

Dalam sistem tiga dimensi seperti ini, ada tiga nilai Lyapunov eksponen (LE1, LE2, LE3). Secara lebih rinci untuk sistem disipatif kontinu 3D nilai-nilai Lyapunov eksponen berguna untuk membedakan antara berbagai jenis orbit. Jadi, kemungkinan spektrum *attractor*, kelas ini sistem dinamis, dapat diklasifikasikan dalam empat kelompok, berdasarkan Lyapunov eksponen [25 -28].

- (LE1, LE2, LE3)  $\rightarrow (-, -, -)$ : *fixed point*
- (LE1, LE2, LE3)  $\rightarrow (0, -, -)$ : *limit point*
- (LE1, LE2, LE3)  $\rightarrow (0, 0, -)$ : *two-torus*
- (LE1, LE2, LE3)  $\rightarrow (+, 0, -)$ : *strange attractor* (Gambar 1).

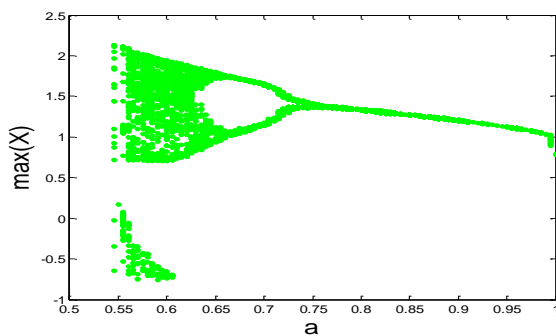
Jadi, dari diagram Lyapunov eksponen sistem Jerk pada Gambar 2, perilaku chaos yang diharapkan, dari set parameter yang sama dan kondisi awal sistem dapat disimpulkan.



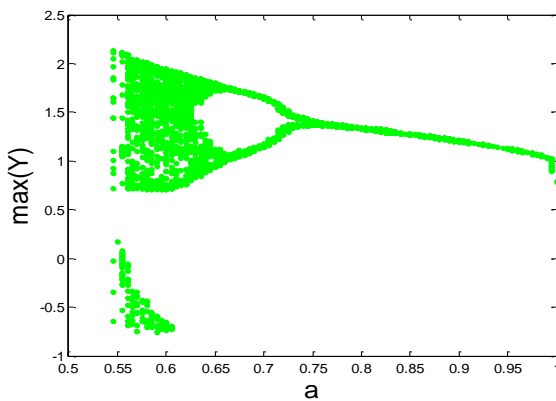
Gambar 2. Dinamika Lyapunov eksponen dari sistem Jerk, pada saat  $a = 0.6$  dan  $b = 1$ .

Teori bifurkasi pada awalnya dikembangkan oleh Poincaré. Hal ini digunakan untuk menunjukkan perubahan kualitatif dalam perilaku sistem, dalam hal jumlah dan jenis solusi, di bawah variasi satu atau lebih parameter pada sistem tergantung [29-30]. Untuk mengamati dinamika sistem dalam semua kemungkinan bifurkasi diatas, diagram bifurkasi dapat dibangun, yang menunjukkan variasi salah satu keadaan variabel dengan salah satu parameter kontrol. Sebuah program MATLAB ditulis untuk mendapatkan diagram bifurkasi untuk sirkuit Jerk dari Gambar 3(a)-(c). Jadi, dalam diagram ini diagram bifurkasi kemungkinan untuk sistem (1), pada interval  $0,55 \leq a \leq 1$ , ditampilkan. Untuk

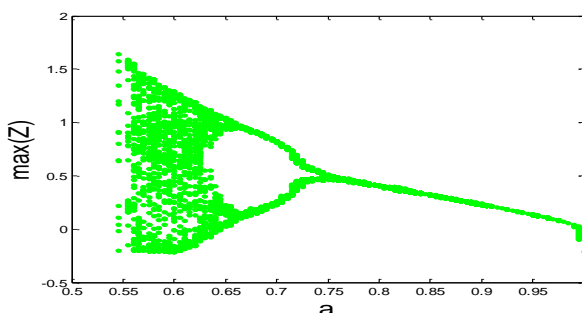
nilai yang dipilih dari  $0,55 \leq a \leq 0,6$  sistem menampilkan perilaku chaos yang diharapkan. Untuk  $0,6 < a \leq 0,76$ , perilaku sistem periode-2 dari sistem yang diamati, dan akhirnya untuk  $a > 0,76$  periode-1 sistem perilaku ditunjukkan.



(a)



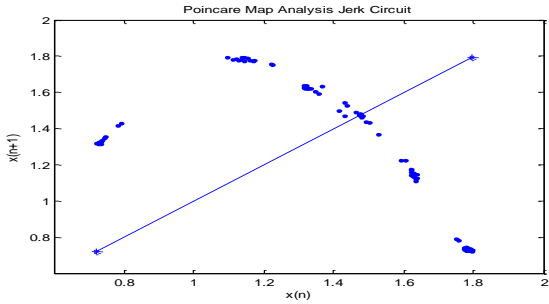
(b)



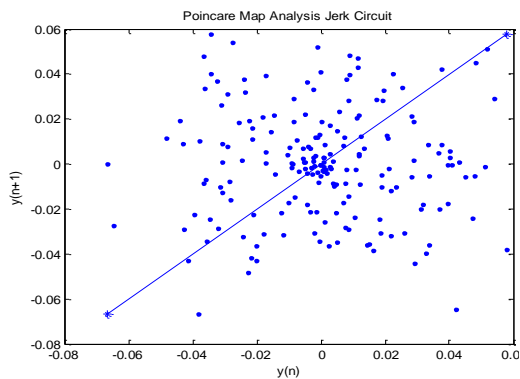
(c)

Gambar 3. (a) diagram bifurkasi  $x$  vs parameter kontrol, (b) diagram bifurkasi  $y$  vs parameter kontrol dan (c) diagram bifurkasi dari  $z$  vs parameter kontrol, untuk nilai-nilai ( $a = 0,6$  dan  $b = 1$ ), dengan MATLAB 2010.

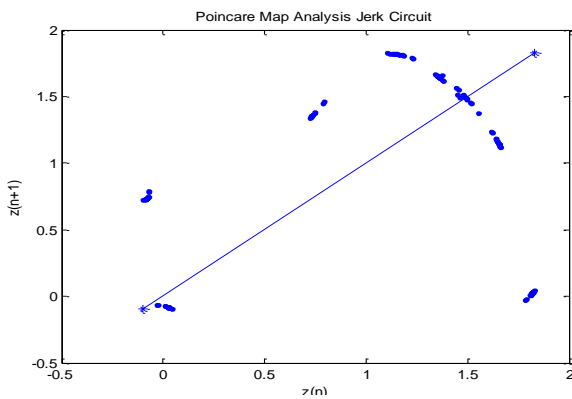
Metode lain yang berguna untuk menganalisis karakteristik dinamik dari sistem non linier adalah peta Poincaré. Dalam keadaan chaos, *potret fase* yang sangat padat, dalam arti bahwa lintasan gerak yang sangat dekat satu sama lain. Hal ini dapat hanya diindikasikan dari *minima* dan *maxima* gerak. Setiap karakterisasi lain gerak sulit untuk ditafsirkan. Jadi, salah satu cara untuk menangkap fitur kualitatif *strange attractor* adalah untuk mendapatkan peta Poincaré [29,31]. Gambar 4 (a) - (c) menunjukkan bagian peta Poincaré dengan menggunakan MATLAB, untuk  $a = 0,6$  dan  $b = 1$ .



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. Sebuah galeri peta Poincare untuk sistem (1) ketika  $a = 0.6$  dan  $b = 1$ :

- (a) menunjukkan plot diberi maxima  $x(n + 1)$  terhadap  $x(n)$ ,
- (b)
- (c)

menunjukkan plot maxima dari  $y(n + 1)$  terhadap  $y(n)$ , (c) menunjukkan plot maxima dari  $z(n + 1)$  terhadap  $z(n)$ ,

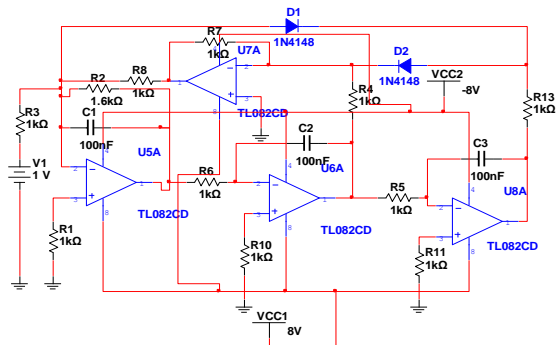
dengan MATLAB 2010

## 2.2 Simulasi Sirkuit Jerk Menggunakan MultiSIM

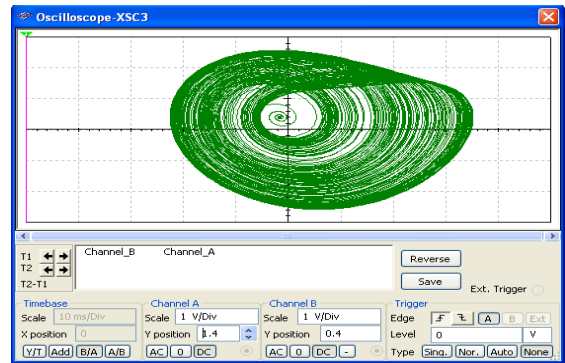
Desain sirkuit pada sistem (1) ditunjukkan pada Gambar 5. Sirkuit Jerk ini juga memiliki *attractor* dinamika tak terbatas, yang memanifestasikan saturasi dari op-amp. Jika op-amp saturasi, perlu untuk *me-restart* sirkuit. Hubungan antara resistor  $R, R_A$  digunakan dalam rangkaian dan parameter ' $a$ ' yang disebutkan dalam sistem (1) diberikan di bawah ini. Berikut  $R$  dan  $R_A$  diukur dalam  $K\Omega$ .

$$R_A = \frac{R}{a} \tag{6}$$

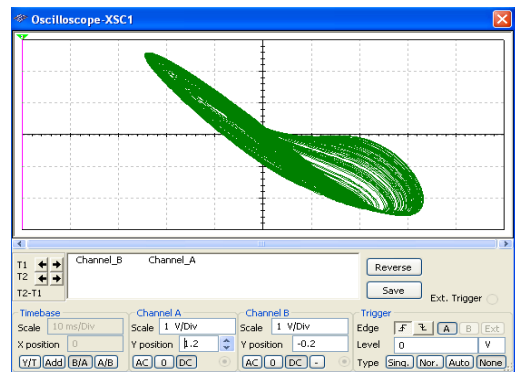
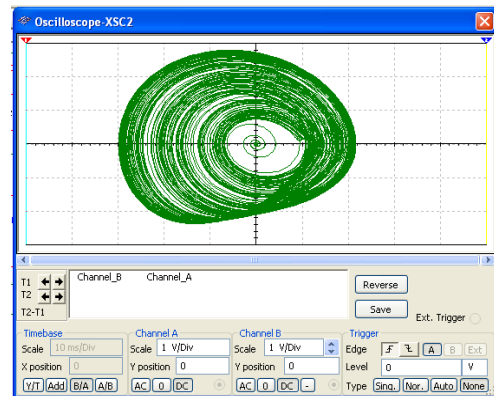
Dimana  $R_A = R_2 = 2\text{ K}\Omega$  dan  $R = 1\text{ K}\Omega$ . Terjadinya *attractor* chaos dapat dengan jelas dilihat pada Gambar 6 (a)-(c). Dengan membandingkan Gambar 1 (a)-(c) dengan Gambar 6 (a)-(c) perbandingan kualitatif baik antara integrasi numerik (1) dengan menggunakan MATLAB 2010, dan simulasi rangkaian dengan menggunakan MultiSIM 10.0, dapat disimpulkan.



Gambar 5. Skema Sirkuit Jerk menggunakan MultiSIM 10.0



(a)



(b)

(c)

Gambar 6. Galeri proyeksi *attractor* chaos menggunakan MultiSIM 10.0, untuk  $a = 0,6$



dan  $b = 1$ : (a) bidang  $xy$  (b) bidang  $yz$  (c) bidang  $xz$ .

### 3. Sinkronisasi *Unidirectional* Sirkuit Jerk

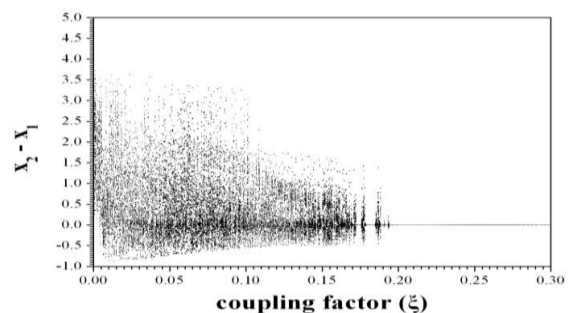
Skema umum untuk sinkronisasi di sini adalah untuk mengambil sistem *master*, membuat subsistem *drive* dan duplikat dari subsistem ini, disebut respon atau sistem *slave*, dengan sinyal dari sistem *drive*. Dalam sinkronisasi *unidirectional*, evolusi sistem pertama (*master*) tidak berubah dengan kopling, sementara sistem kedua (*slave*) dibatasi untuk menyalin dinamika pertama [32]. Berikut ini konfigurasi *master-slave (unidirectional)* dijelaskan di bawah ini:

$$\left. \begin{aligned} & \text{Master} \\ \dot{x}_1 &= y_1 \\ \dot{y}_1 &= z_1 + \xi(y_2 - y_1) \\ \dot{z}_1 &= -az_1 - by_1 + |x_1| - 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

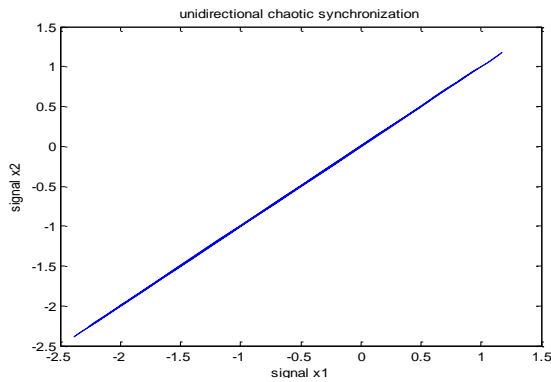
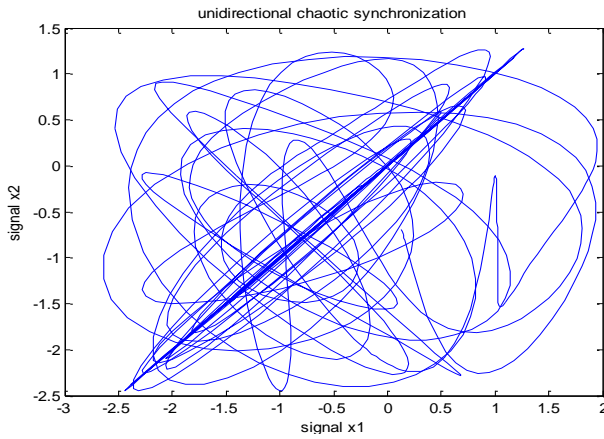
$$\left. \begin{aligned} & \text{Slave} \\ \dot{x}_2 &= y_2 \\ \dot{y}_2 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= -az_2 - by_2 + |x_2| - 1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Dimana,  $\xi$  adalah faktor kopling. Simulasi numerik digunakan untuk menggambarkan dinamika fenomena sistem sinkronisasi *unidirectional* sirkuit Jerk (7-8) dengan metode Runge-Kutta orde 4.

Pada Gambar 7 diagram bifurkasi ( $x_2 - x_1$ ) vs  $\xi$  ditampilkan. Dari diagram ini transisi klasik dari sinkronisasi penuh, untuk nilai-nilai faktor kopling rendah ( $0 < \xi \leq 0.194$ ), untuk sinkronisasi penuh dengan nilai yang lebih tinggi dari kopling faktor ( $\xi > 0.194$ ), dikonfirmasi. Gambar 8 (a) menunjukkan fenomena tidak sinkron pada saat parameter kopling  $\xi = 0.184$ , sementara pada Gambar 8 (b) menunjukkan fenomena sinkronisasi chaos ketika parameter kopling  $\xi = 0.250$  dengan menggunakan MATLAB 2010.



Gambar 7. Diagram bifurkasi  $(x_2-x_1)$  vs  $\xi$ , dalam kasus kopling *unidirectional*.



(b)

Gambar 8. Simulasi fase potret  $x_2$  vs  $x_1$  pesawat, dalam kasus kopling *unidirectional*,

untuk (a)  $\xi = 0,184$  dan (b)  $\xi = 0,25$ , dengan MATLAB 2010.

#### 4. Aplikasi Sistem Keamanan Komunikasi

Untuk membuat sistem keamanan komunikasi, sinyal chaos berfungsi sebagai

masking data informasi. Untuk mempelajari efektivitas sinyal masking dalam sistem keamanan komunikasi. Pertama, kita mengatur sinyal informasi  $m_s(t)$  dalam bentuk gelombang sinusoidal:

$$m_s(t) = A \sin(2\pi f t) \tag{9}$$

Dimana  $A$  dan  $f$  adalah amplitudo dan frekuensi dari masing-masing sinyal gelombang sinusoidal.

Penjumlahan sinyal  $m_s(t)$  dan sinyal chaos  $m_{Jerk\_circuit}(t)$ , yang dihasilkan oleh sirkuit Jerk adalah enkripsi sinyal baru  $m_{encryption}(t)$ , yang diberikan oleh Persamaan. (10).

$$m_{encryption}(t) = m_s(t) + m_{Jerk\_circuit}(t) \tag{10}$$

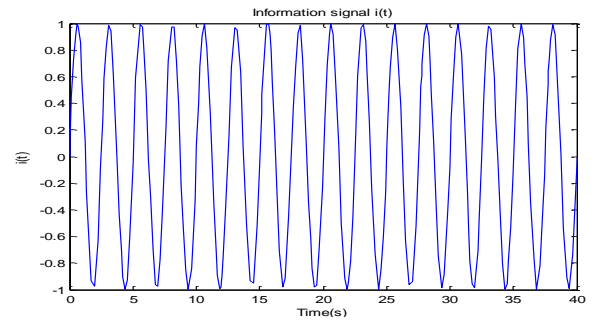
Sinyal  $m_{Jerk\_circuit}(t)$  adalah salah satu parameter dari persamaan (10). Setelah menyelesaikan proses enkripsi sinyal asli dapat dipulihkan dengan prosedur berikut.

$$m_{New\_Signal}(t) = m_{encryption}(t) - m_{Jerk\_circuit}(t) \quad (11)$$

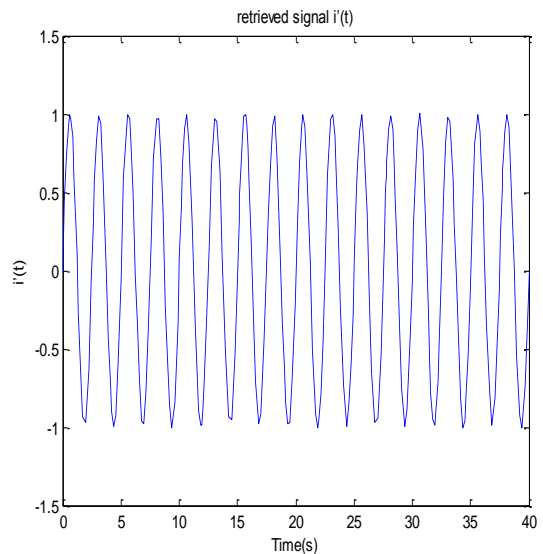
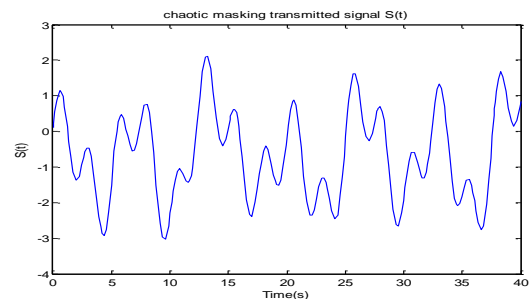
Jadi,  $m_{New\_Signal}(t)$  adalah sinyal asli dan harus sama dengan  $m_s(t)$ . Karena kenyataan bahwa sinyal input dapat dipulihkan kembali dari sinyal output, ternyata mungkin untuk menerapkan sistem komunikasi yang aman dengan menggunakan sistem chaos yang diusulkan.

#### 4.1 Simulasi Numerik Menggunakan MATLAB 2010

Gambar 9 (a)-(c) menunjukkan hasil simulasi numerik dengan MATLAB 2010 untuk skema masking komunikasi chaos yang diusulkan, untuk  $A = 1V$  dan  $f = 4$  KHz. Nilai yang dipilih dari faktor kopling adalah  $\xi = 0.250$  agar sistem berada dalam rezim sinkronisasi chaos.



(a)



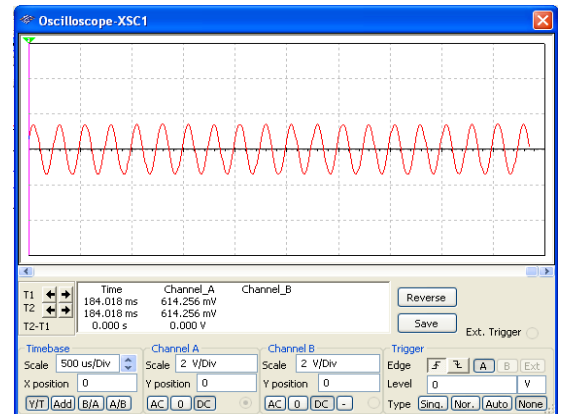
(a) (c)

Gambar 9. Simulasi Jerk sirkuit MATLAB 2010 sistem *masking* komunikasi, untuk  $A = 1V$  dan  $f = 4$  KHz: (a) Sinyal informasi, (b) sinyal chaos yang ditransmisikan, (c) Sinyal informasi baru.

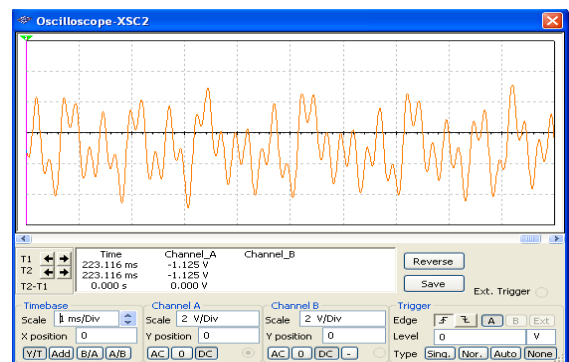
## 4.2 Simulasi Sirkuit Menggunakan MultiSIM 10.0

Pada tahun 1990, Louis M. Pecora dan Thomas L. Carrol pertama menemukan fenomena sinkronisasi dua sistem chaos identik. Kita tahu bahwa kekacauan deterministik dapat menghasilkan perilaku dinamik chaos. Oleh karena itu, sinyal chaos sangat cocok untuk dijadikan sistem keamanan komunikasi. Pada tahun 1993, Cuomo dan Oppenheim menyajikan skema pertama dari perangkat komunikasi dua osilator Lorenz yang identik.

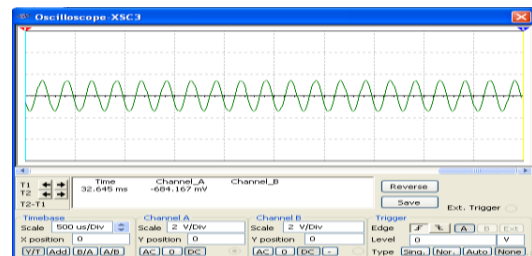
Prinsip sistem keamanan komunikasi adalah Informasi rahasia oleh sinyal chaos pada pemancar, dan kemudian dikirim ke penerima melalui saluran publik. Akhirnya sinyal terenkripsi oleh penerima. Dalam skema ini, masalah utama adalah bahwa dua generator chaos yang identik dalam *transmitter* dan *receiver* perlu disinkronkan. Gambar 10 menunjukkan hasil simulasi untuk sistem sinyal *masking* komunikasi menggunakan MultiSIM 10.0.



(a)



(b)

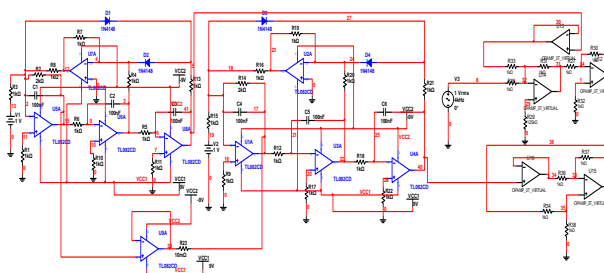


(c)

Gambar 10. Multisim 10,0 output dari sirkuit Jerk sistem masking komunikasi ketika amplitudo 1 V dan frekuensi 4 KHz (a) Sinyal informasi, (b) sinyal chaos yang ditransmisikan, (c) Sinyal informasi baru

Juga, dalam skema yang diusulkan masking, sinyal gelombang sinusoidal

dengan amplitudo 1 V dan frekuensi 4 KHz ditambahkan ke sinyal *master* sinkronisasi chaos dalam rangka regenerasi sinyal *master* asli pada penerima. Jadi, seperti ditunjukkan pada Gambar 10 (c), sinyal pesan telah sempurna pulih dengan menggunakan pendekatan sinyal *masking* melalui sinkronisasi chaos sirkuit Jerk. Selanjutnya, hasil simulasi dengan MultiSIM 10.0 telah menunjukkan bahwa kinerja sinyal chaos yang ditransmisikan dan pemulihan pesan sangat memuaskan. Akhirnya, Gambar 11 menunjukkan rangkaian skematik penerapan sirkuit Jerk dalam sistem keamanan komunikasi.



Gambar 11. Skema Sirkuit Jerk untuk sistem komunikasi berbasis chaos

## 5. Kesimpulan

Dalam tulisan ini, telah dilakukan analisis terhadap sirkuit Jerk sehingga dapat ditentukan parameter yang dapat menghasilkan kondisi sinyal chaotic. Selain itu, telah diperoleh bahwa sirkuit Jerk dapat disinkronisasi dengan metode kopling *unidirectional* dengan tingkat *error* yang kecil. Berdasarkan sinkronisasi yang diperoleh, sirkuit Jerk dapat digunakan sebagai *masking* data untuk sistem keamanan komunikasi. Semua simulasi sirkuit telah diuji menggunakan program MATLAB dan simulasi sirkuit menggunakan MultiSIM. Akhirnya, hasil simulasi menunjukkan efektivitas dari skema yang diusulkan.

## Daftar Pustaka

- [1]. H. Zhang, Chaos Synchronization and Its Application to Secure Communication, PhD thesis, University of Waterloo, Canada, 2010.
- [2]. H. Jaenudin., A. Sambas., Halimatussadiyah., dan Mada,

- S.W.S., 2012, Analisis *Chaotic* Sistem Dinamika Tiga Bandul dan Tiga pegas, *Prosiding Konferensi Fisika I*, Vol. 1, No. 1, pp. 46-48, ISSN 2301-5284.
- [3]. K. Nakajima and Y. Sawada., 1979, Experimental Studies on the Weak Coupling of Oscillatory Chemical Reaction Systems. *J. Chem. Phys.*, Vol. 72, No. 4, pp. 2231–2234.
- [4]. J. L. Hindmarsh and R. M. Rose, 1984, A model of neuronal bursting using three coupled first order differential equations, *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*. Vol. 221, No. 1222, pp. 87-102.
- [5]. Ch. K. Volos, N. G. Bardis, I. M. Kyprianidis and I. N. Stouboulos, 2012., Implementation of Mobile Robot by Using Double-Scroll Chaotic Attractors, *WSEAS Recent Researches in Applications of Electrical and Computer Engineering*, Vouliagmeni Beach, Athens, Greece., pp. 119–124.
- [6]. Ch. K. Volos, I. M. Kyprianidis and I. N. Stouboulos., 2012., Motion Control of Robots Using a Chaotic Truly Random Bits Generator, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, Vol. 5, No. 2, pp. 6–11.
- [7]. J. C. Sprott., 2004., Dynamical Models of Love, *Nonlinear Dyn. Psych. Life Sci.*, Vol. 8, pp. 303–314.
- [8]. M. Sanjaya W. S., I. Mohd, M. Mamat and Z. Salleh., 2012., Mathematical Model of Three Species Food Chain Interaction with Mixed Functional Response, *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, Vol. 9, pp. 334–340.
- [9]. M. Sanjaya W. S, M. Mamat, Z. Salleh., I. Mohd and N. M. N. Noor., 2004. Numerical Simulation Dynamical Model of Three Species Food Chain with Holling Type-II

- Functional Response, *Malaysian Journal of Mathematical Sciences*, Vol. 5, No. 1, pp. 1–12.
- [10]. Ch. K. Volos, I. M. Kyprianidis, and I. N. Stouboulos, 2012, Synchronization Phenomena in Coupled Nonlinear Systems Applied in Economic Cycles, *WSEAS Trans. Syst.*, Vol. 11, No. 12, pp. 681–690.
- [11]. T. L. Carroll, 1995., A Simple circuit demonstrating regular and synchronized chaos. *Am J Phys.* Vol. 63, No.4, pp. 377-379.
- [12]. C.K. Volos, I.M. Kyprianidis, and I.N. Stouboulos, 2007., Synchronization of two Mutually Coupled Duffing – type Circuits, *International Journal of Circuit, Systems and Signal processing.* Vol.1, No. 3, pp. 274-281.
- [13]. M. Mamat, M. Sanjaya S.W.S and D. S. Maulana. 2013. Numerical Simulation Chaotic Synchronization of Chua Circuit and Its Application for Secure Communication. *Applied Mathematical Sciences*, Vol. 7, No. 1, pp. 1 – 10.
- [14]. M. Mamat, M. Sanjaya.W.S, Z. Salleh, N.M Mohamad Noor, and M. F.Ahmad, 2012. Numerical Simulation of Unidirectional Chaotic Synchronization of Non-Autonomous Circuit and Its Application for Secure Communication. *Adv. Studies Theor. Phys.*, Vol. 6, No. 10, pp. 497 – 509.
- [15]. M. Mamat, M., Z. Salleh., M. Sanjaya W. S., and Mohd, I. 2012.The Dynamics of Chaotic FitzHugh-Nagumo Neuronal Systems. *Applied Mathematical Sciences*, Vol 6. No. 38, pp. 1863 – 1876.
- [16]. M. Sanjaya, W. S., M. Mamat, Z. Salleh, and I Mohd., 2011. Bidirectional Chaotic Synchronization of Hindmarsh-Rose Neuron Model. *Applied Mathematical Sciences*, Vol. 5, No. 54, pp. 2685 – 2695.
- [17]. A. Sambas, M. Sanjaya W.S dan Halimatussadiyah, 2012,

- Unidirectional Chaotic  
Synchronization of Rossler Circuit  
and Its Application for Secure  
Communication, *WSEAS Trans. Syst.*,  
Vol. 11, No. 9, pp. 506-515.
- [18]. K. M. Cuomo and A. V. Oppenheim,  
1993., Circuit implementation of  
synchronized chaos with applications  
to communications, *Phys. Rev Lett.*,  
Vol. 71, No. 1, pp. 65-68.
- [19]. J. Z. Zhang, A. B. Wang, J. F. Wang,  
and Y. C. Wang, 2009., Wavelength  
division multiplexing of chaotic  
secure and fiber-optic  
communications, *Opt. Express*. Vol.  
17, No. 8, pp. 6357–6367.
- [20]. M.J. Rodriguez, R.J. Reategui, and  
A.N. Pisarchik., 2012., Secure  
Communication Based on Chaotic  
Cipher and Chaos Synchronization.,  
*Discontinuity, Nonlinearity and  
Complexity*, Vol. 1, pp. 57-68.
- [21]. F. Rogister, A. Locquet, D. Pieroux,  
M. Sciamanna, O. Deparis, P. Mégret  
, and M. Blondel., 2001., [Secure  
communication scheme using chaotic  
laser diodes subject to incoherent  
optical feedback and incoherent  
optical injection](#). *Optics Letters*. Vol.  
26, No. 19, pp. 1486-1488.
- [22]. J. C. Sprott, Simple Chaotic Systems  
and Circuits, 2000., *Am. J. Phys.*, Vol.  
68, pp. 758–763.
- [23]. Q. H. Alsafasfeh and M. S. Al-Arni.,  
2011., A New Chaotic Behavior from  
Lorenz and Rossler Systems and Its  
Electronic Circuit Implementation.,  
*Circuits and Systems*, Vol. 2, pp. 101–  
105.



- [24]. A. Wolf., 1986, Quantity Chaos with Lyapunov Exponents, *Chaos, Princeton University Press*, pp. 273-290.
- [25]. R. Gencay and Dechert W.D., 1992, An Algorithm For The n-Lyapunov Exponents Of An n-dimensional Unknown Dynamical System, *Physica D*, Vol. 59, pp.142-157.
- [26]. M. Sano, and Y. Sawada., 1985, Measurement of the Lyapunov spectrum from a chaotic time series, *Phys. Rev. Lett.* Vol. 55, pp. 1082 – 1085.
- [27]. F. Han, Multi-Scroll Chaos Generation Via Linear Systems and Hysteresis Function Series, PhD thesis, Royal Melbourne Institute of Technology University, Australia, 2004.
- [28]. Z. Jing, D. Xu, Y. Chang, L. Chen, 2003., Bifurcations, chaos, and system collapse in a three node power system, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol.25, No.6, pp.443-461.
- [29]. V. V. Bykov, 1998., On bifurcations leading to chaos in Chua's circuit. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. Vol 8, no. 4, pp. 685-699.
- [30]. K. M. Cuomo and A. V. Oppenheim, 1994., Circuit Implementation of Synchronized Chaos With Applications to Communication, Chapter 15 in *Coping with Chaos*, E. Ott, T. Sauer, and J. A. Yorke, Eds. New York, New York: *John Wiley & Sons, Inc.*, pp. 381-384.