

Interval Type-2 Fuzzy Logic System untuk Diagnosis Coronary Artery Disease

Adha Mashur Sajiah^{1,*}, Noor Akhmad Setiawan¹

¹ Departemen Teknik Elektro & Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2 Yogyakarta—55281, Indonesia

* E-mail : adha.m.sajiah@gmail.com

Abstrak. *Coronary artery disease* (CAD) merupakan penyakit yang sudah menjadi penyakit nomor satu paling mematikan di Indonesia. Rasio kardiolog terhadap potensi penderita pun sangat tidak sesuai. Sistem cerdas yang dapat membantu dokter atau pasien untuk diagnosis CAD dengan murah, cepat dan efisien dibutuhkan. Data rekam medis serta teknologi komputer dapat dimanfaatkan untuk membentuk sistem cerdas berbasis *fuzzy logic*. *Type-1 fuzzy logic system* (T1 FLS) telah digunakan secara luas di berbagai bidang setelah lebih dari tiga dekade sejak L. Zadeh memperkenalkannya pada tahun 1965. T1 FS memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan dan memodelkan ketidakpastian dan meminimalisir pengaruhnya. Sepuluh tahun setelah memperkenalkan T1 FS, 1975, L. Zadeh juga memperkenalkan *type-2 fuzzy set* (T2 FS) sebagai himpunan fuzzy yang dapat memodelkan ketidakpastian lebih canggih. Tapi T2 FS baru menjadi populer beberapa tahun ini sejak Mendel dan Karnik pada tahun 1998 memberikan teori lengkap mengenai *type-2 fuzzy logic system* (T2 FLS). T2 FLS memiliki derajat kebebasan yang lebih tinggi ketika memodelkan ketidakpastian tetapi sulit dalam membuat fungsi keanggotaan. Paper ini bertujuan menggambarkan pengembangan sistem diagnosis CAD dengan *Interval T2 Fuzzy Logic System*. Rule diformulasikan dengan bantuan Weka 3.0. Penelitian ini menggambarkan faktor resiko penyebab CAD, fuzzifikasi, *type reduction* dan defuzzifikasi. Penelitian ini berfokus pada pemanfaatan IT2 fuzzy set untuk menyelesaikan domain masalah. Sistem yang dihasilkan menghasilkan rerata akurasi 73.78%, sensitivitas 71.94% dan spesifitas 76.52%.

Kata Kunci: *Coronary Artery Disease, Fuzzy logic System, Interval Type-2 Fuzzy Set, Weka*

1. Pendahuluan

Coronary artery disease (CAD) adalah salah satu penyebab terbesar kematian di dunia dalam satu dekade terakhir [1]. CAD menjadi pandemik karena negara berkembang mengalami peralihan epidemiologis dari penyakit kelaparan ke penyakit degeneratif. Lebih lagi, CAD cenderung menimpa populasi yang berusia lebih muda dan demikian dapat menurunkan produktivitas dan ketenagakerjaan [2]. Tak terkecuali di Indonesia data pada tahun 2012 menunjukkan penyakit ini menempati posisi teratas penyebab kematian di Indonesia.

CAD merupakan penyakit yang diakibatkan akumulasi plak dalam arteri koroner. Arteri koroner bertugas menyuplai jantung dengan darah yang kaya oksigen. Plak tersebut terdiri dari lemak, kolesterol, kalsium dan unsur-unsur lain. Keadaan ini disebut *atherosclerosis* [3].

Masalah utama masyarakat Indonesia adalah datang ke dokter ketika gejala yang dialami ketika penyakit CAD semakin parah. Jika pasien bisa lebih sadar akan kesehatan jantungnya dan dapat mengecek kesehatan jantung lebih awal dengan gejala-gejala tahap awal maka akan sangat membantu penderita CAD.

Dalam kasus di atas maka perlu untuk mengembangkan sistem klasifikasi penyakit CAD berbasis komputer. Sistem cerdas buatan menjadi solusi yang tepat untuk melakukan diagnosis lebih awal, cepat dan murah. Sistem cerdas yang dapat dipilih adalah menggunakan *fuzzy logic system*.

Type-1 fuzzy logic system (T1 FLS) telah digunakan secara luas di berbagai bidang lebih dari tiga dekade [4]. L. Zadeh memperkenalkan *type-1 fuzzy set* (T1 FS) pada tahun 1965. Walaupun T1 FS dimaksudkan untuk merepresentasikan ketidakpastian, penelitian telah menunjukkan T1 FS memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan dan memodelkan ketidakpastian dan meminimalisir pengaruhnya. Hal ini karena T1 FS itu pasti dalam artian bahwa nilai keanggotaannya adalah nilai *crisp* [5]. Lalu 10 tahun setelah memperkenalkan T1 FS, 1975, L. Zadeh juga memperkenalkan *type-2 fuzzy set* (T2 FS) sebagai himpunan fuzzy yang dapat memodelkan ketidakpastian lebih canggih.

Tahun 1998, Mendel dan Karnik memberikan teori lengkap mengenai *type-2 fuzzy logic system* (T2 FLS) [4]. T2 FS adalah himpunan dengan fungsi keanggotaannya berbentuk T1 FS. *Fuzzy logic* dengan ordo yang lebih tinggi (ber-orde 2) baru tahun belakangan ini menjadi populer diterapkan pada kasus *pattern recognition*, *classification* dan *clustering* [6].

Interval type-2 fuzzy set (IT2 FS) adalah jenis khusus dari T2 FS, merupakan jenis T2 FS yang paling luas digunakan karena biaya komputasi yang lebih rendah daripada T2 FS asli. T2 FLS adalah *fuzzy logic system* dimana paling tidak memiliki satu T2 FS. *Fuzzy logic system* membutuhkan *type reducer* untuk mengubah T2 FS ke T1 FS karena keluaran dari *fuzzy inference engine* adalah T2 FS.

Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa hasil T2 FLS lebih baik dari T1 FLS. Tutorial dan artikel yang semakin banyak mengenai T2 FLS mengakibatkan jumlah penelitian mengenai T2 FLS juga semakin banyak. Walaupun biaya komputasi T2 FLS lebih besar dari T1 FLS tapi kemajuan kemampuan komputasi perangkat keras yang juga semakin tinggi menyelesaikan masalah ini.

T2 FLS memiliki banyak parameter yang perlu diperhatikan. Memilih fungsi keanggotaan, memilih *type reducer* ataupun memilih *defuzzifier*. Ini merupakan potensi yang dimiliki T2 FLS. Sistem otomasi diagnosis penyakit CAD dengan *fuzzy logic system* telah banyak dilakukan. Tetapi fuzzy set yang digunakan masih menggunakan T1 FS.

2. Landasan Teori

2.1 Coronary Artery Disease (CAD)

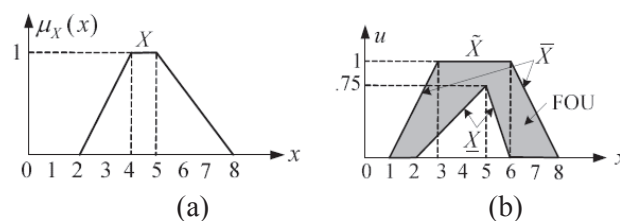
Coronary artery disease merupakan penyakit yang penyebabnya multi faktor dengan banyak faktor risikonya dipengaruhi gaya hidup. CAD adalah hasil dari akumulasi plak pada arteri koroner. Arteri tersebut menyediakan *myocardium* dengan darah yang kaya akan oksigen. Plak terdiri dari lemak, kolesterol, kalsium dan zat lain. Kondisi ini disebut *atherosclerosis*. Ketika plak semakin berkembang hal tersebut mempersempit lumen (saluran di bagian tengah pembuluh nadi). Akibatnya darah yang mengalir ke otot jantung berkurang. Ini mengakibatkan ketidaknyamanan atau sakit. Sakit bisa terasa di dada, leher, rahang, perut, lengan dan bahu, yang biasa disebut dengan angina. Selama angina jumlah aliran darah kaya oksigen berkurang. Tetapi ketika penyakit semakin berkembang lumen arteri koroner semakin menyempit karena ukuran plak yang semakin meningkat. Oleh karena itu jumlah darah yang disuplai ke jaringan menjadi tidak cukup untuk menyediakan kebutuhan jaringan. Keadaan ini disebut *myocardial ischemia* dan jaringan tersebut tidak bekerja pada kapasitas optimalnya. Ketika lumen arteri koroner hampir tertutup sepenuhnya, benar-benar membatasi aliran darah beroksigen, jaringan di daerah *myocardium* menyebabkan *myocardial infarction* (dikenal sebagai serangan jantung) yang sering mengakibatkan kematian mendadak [3].

2.2 Interval Type-2 Fuzzy Logic System (IT2 FLS)

Untuk memberikan petunjuk yang jelas bagi peneliti yang ingin membangun *interval type-2 fuzzy logic system*, Wu memberikan penjelasan [5] sebagai berikut.

Type-1 Fuzzy Set (T1 FS)

Contoh sebuah T1 FS, X , ditunjukkan pada Gambar. 1(a). Jika hanya bilangan integer pada domain x , T1 FS dapat dinyatakan $\{0/2, 0.5/3, 1/4, 1/5, 0.67/6, 0.33/7, 0/8\}$, dimana $0/2$ berarti angka 2 mempunyai derajat keanggotaan 0 pada T1 FS X . Berbeda pada *crisp set*, derajat keanggotaan tiap elemen hanya boleh 0 atau 1. Tidak ada nilai di antara 0 dan 1.



Gambar 1. Contoh T1 FS (a) dan IT2 FS (b) [5]

Fungsi keanggotaan, $\mu_X(x)$, dari T1 FS dapat dipilih berdasarkan pendapat ahli atau menggunakan prosedur optimasi.

Interval Type-2 Fuzzy Set (IT2 FS)

Interval type-2 FS adalah jenis khusus *type-2* FS, paling luas digunakan saat ini karena biaya komputasi yang lebih rendah dari T2 FS. Contoh sebuah IT2 FS, $\tilde{X}$, ditunjukkan pada Gambar. 1(b).

Dari pengamatan dapat dilihat tidak seperti T1 FS, yang keanggotaannya untuk tiap x adalah angka, keanggotaan IT2 FS adalah interval. Sebagai contoh, keanggotaan angka 3 adalah $[0.25, 1]$. IT2 FS dibatasi pada atas dan bawah oleh dua T1 FS, $\tilde{X}$ dan $\underline{X}$, yang masing-masing disebut *upper MF* (UMF) dan *lower MF* (LMF). Area antara $\tilde{X}$ dan $\underline{X}$ adalah *footprint of uncertainty* (FOU).

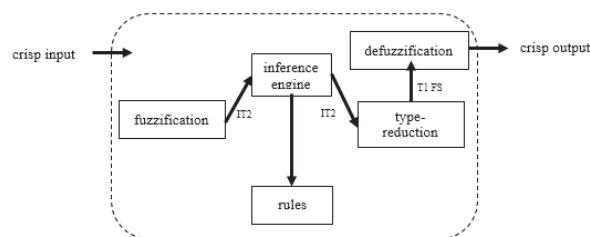
Interval Type-2 Fuzzy Logic System (IT2 FLS)

Gambar. 2 menunjukkan diagram skema IT2 FLS. Hampir mirip dengan T1 FLS dengan perbedaan utama adalah penggunaan IT2 FS pada *rule base*. Output yang dihasilkan oleh sistem pun adalah IT2 FS sehingga perlu adanya *type-reducer* untuk mengkonversi IT2 FS ke T1 FS sebelum dilakukan defuzzifikasi.

Dalam prakteknya komputasi IT2 FLS dapat disederhanakan. Misalkan *rule base* sebuah IT2 FLS terdiri dari N rule dengan bentuk sebagai berikut:

$$R^n: \text{IF } x_1 \text{ is } \tilde{X}_1^n \text{ and ... and } x_l \text{ is } \tilde{X}_l^n \text{ THEN } y \text{ is } Y^n \quad n = 1, 2, 3, \dots, N$$

Dimana $\tilde{X}_i^n$ ($i = 1, \dots, l$) adalah IT2 FS, dan $Y^n = [\underline{y}^n, \bar{y}^n]$ adalah sebuah interval, dimana dapat dianggap sebagai *centroid* dari konsekuen IT2 FS.



Gambar 2. IT2 FLS [5].

3. Fuzzy Logic System untuk Diagnosis Coronary Artery Disease

Penelitian mengenai CAD diagnosis berbasis *type-1 fuzzy logic system* telah banyak dilakukan oleh para peneliti. Beberapa penelitian yang signifikan dari mereka adalah sebagai berikut.

3.1 Plain Fuzzy Logic System berbasis *rule*

Untuk diagnosis *coronary artery disease* (CAD) Pal dkk. [3] mengusulkan *fuzzy decision support system* (DSS) berbasis *rule*. Langkah metodologi yang digunakan yaitu: (1) akuisisi pengetahuan dari kardiolog dengan metode interview terstruktur. Dari hasil interview tersebut dihasilkan tujuh faktor resiko yaitu umur, kebiasaan merokok, obesitas, hipertensi, diabetes, profil lipid dan nyeri pada dada. (2) desain struktur sistem pakar CAD. Fuzzifikasi dan *knowledge base* dibuat berdasarkan pengetahuan dan intuisi pakar. Keluaran sistem diproses menggunakan mamdani *inference engine*. Defuzzifikasi dihitung menggunakan metode *centroid*. *Rule* dalam sistem ini diatur menggunakan modul-modul dan *meta rule*. Sistem fuzzy ini diuji terhadap 500 dataset. Secara keseluruhan akurasi, spesifisitas, dan sensitivitas dari sistem masing-masing adalah 84.20%, 83.33% dan 95.85%.

3.2 Weighted Fuzzy Rule System

Pada P.K. Anooj [7], *weighted fuzzy rules* digunakan sebagai metode sistem pendukung keputusan untuk prediksi tingkat resiko penyakit jantung. Sistem prediksi resiko penyakit jantung yang diusulkan terdiri dari dua fase: (1) pendekatan otomatis untuk menghasilkan *weighted fuzzy rule* dan (2) pengembangan sistem pendukung keputusan fuzzy berbasis aturan. Fase pertama menggunakan teknik *data mining*, pemilihan atribut dan pembobotan atribut untuk menghasilkan *weighted fuzzy rule*. Selanjutnya *weighted fuzzy rule* yang diperoleh digunakan sebagai representasi pengetahuan oleh *fuzzy logic system*. Sistem ini diuji terhadap dataset dari University of California, Irvine (UCI) *repository* dan dibandingkan terhadap sistem berbasis jaringan saraf tiruan berdasarkan akurasi,

sensitivitas dan spesifisitas. Secara rerata sistem yang diusulkan melebihi kemampuan dari sistem berbasis jaringan saraf tiruan dan sistem yang diusulkan Markos G. Tsipouras dkk.

3.3 Fuzzy Logic System dengan Rough Set Theory

Pada Setiawan dkk. [8], telah dikembangkan *fuzzy decision support system* untuk diagnosis penyakit CAD. Untuk membentuk basis pengetahuan dilakukan ekstraksi *fuzzy rule* dari data pasien secara otomatis dengan *machine learning*. Proses pembentukan basis pengetahuan merupakan tahap yang menyita waktu dan cenderung bias oleh dokter ahli. Untuk ekstraksi *rule* digunakan *rough set theory*. *Rule* yang dihasilkan selanjutnya diseleksi lagi sehingga digunakan *rule* yang signifikan saja. *Rule* tersebut selanjutnya digunakan pada FDSS. Sistem ini diuji terhadap UCI dataset dan data dari Ipoh Specialist Hospital, Malaysia. Sistem juga diverifikasi dan divalidasi oleh 3 kardiolog.

4. Metodologi Pengembangan Sistem

4.1 Data

Dalam pengembangan sistem ini digunakan dataset Statlog (Heart) dari UCI Machine Learning Repository. Dataset ini adalah *database* CAD yang mirip dengan *database* yang sudah ada di repository Heart Disease Dataset UCI tetapi dengan bentuk yang sedikit berbeda. Beberapa perbedaan misalnya dataset statlog memiliki jumlah dataset yang lebih sedikit dan tidak ada adanya atribut yang hilang.

Dataset statlog terdiri dari 270 observasi data pasien. Atribut dari dataset ini berhubungan dengan hasil pemeriksaan fisik, diagnosis laboratorium dan uji stress, yang semuanya berjumlah 13 atribut informasi dan 1 atribut diagnosis CAD. Tabel 1 menunjukkan bentuk dataset lebih detail.

Tabel 1. Atribut Dataset Statlog

Atribut	Unit	Range
Age	year	29-77
Sex	male (1), female (0)	0, 1
Chest Pain Type	typical angina (1), atypical angina (2), non-anginal pain (3), asymptomatic (4)	1, 2, 3, 4
Resting Blood Pressure	mmHg	94-200
Serum Cholesterol	mg/dl	126-564
Fasting Blood Sugar	fasting blood sugar > 120 mg/dl (1) else (0)	0, 1
Resting Electrocardiographic Results	normal (0), having ST-T wave abnormality (1), LV hypertrophy (2)	0, 1, 2
maximum heart rate achieved	bpm	71-202
exercise induced angina	yes (1), no (0)	0,1
oldpeak	mm	0-6.2
the slope of the peak exercise ST segment	upsloping (1), flat (2), downsloping (3)	1, 2, 3
number of major vessels	-	0-3
thal	normal (3), fixed defect (6), reversable defect (7)	3, 6, 7

4.2 Pengembangan Model Sistem Fuzzy

Untuk membangun sistem fuzzy yang diusulkan dibutuhkan *fuzzifier*, *fuzzy rule*, *fuzzy inference engine*, *type reducer* dan *defuzzifier*. Komponen sistem sesuai dengan Gambar 2 yang menunjukkan komponen dasar IT2 FLS. Untuk memenuhi komponen tersebut dilakukan langkah-langkah berikut.

Pembangkitan Rule

Rule sistem sebagai basis pengetahuan diperoleh dengan menggunakan aplikasi Weka 3.0. Inputannya berupa data latih heart-statlog.rtf. *Classifier* yang digunakan adalah JRip sebuah pengklasifikasi menggunakan algoritma Repeated Incremental Pruning to Produce Error Reduction (RIPPER). Setelah mengklasifikasikan dataset dengan JRip, lalu dihasilkan beberapa rule. Namun rule keluaran JRip berupa rule crisp dengan model

$(a_1 \in_1 \theta_1)$ and $(a_2 \in_2 \theta_2)$ and ... and $(a_n \in_n \theta_n)$

Dimana a adalah atribut/gejala, $\in$ adalah kesamaan atau ketidaksamaan ($=$, $<$, $<=$, $>$, dan $>=$) dan θ adalah nilai crisp. Contoh rule keluaran seperti berikut

$(chest \geq 4)$ and $(number_of_major_vessels \geq 1) \Rightarrow class=present (68.0/5.0)$ **(r1)**

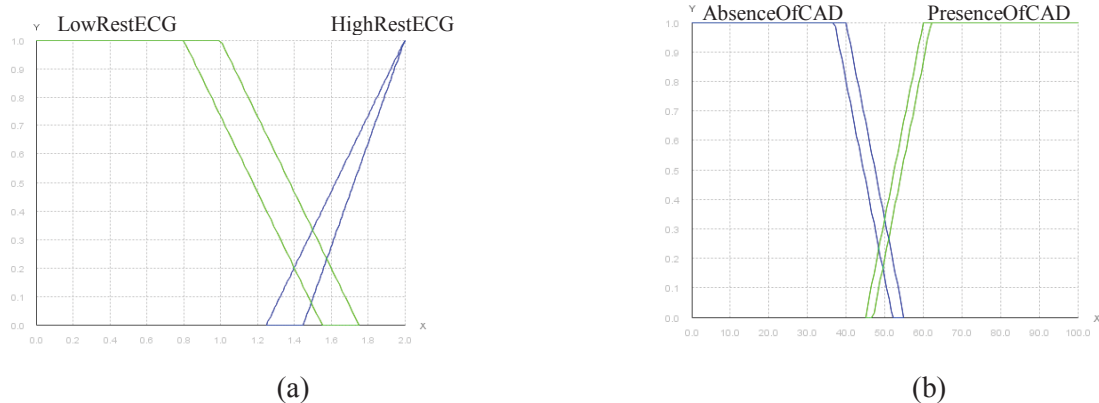
Karena rule fuzzy berupa variabel linguistik namun keluaran JRip adalah rule crisp maka aturan tersebut diubah berdasarkan nilai θ yang disebut *cut value*. Sebagai contoh atribut *chest* pada **r1** memiliki nilai $\theta = 4$ maka nilai $(-\infty, 4)$ menjadi *LowChestPain* dan $[4, \infty)$ menjadi *HighChestPain*. Contoh hasil perubahan **r1** sebagai berikut:

IF HighChestPain AND HighMajorVesselNumber THEN Present **(R1)**

Fungsi Keanggotaan (Membership Function)

Variabel linguistik bersama dengan fungsi keanggotaan digunakan untuk mengubah nilai crisp dari data input ke dalam nilai fuzzy. Langkah ini yang dilakukan oleh *fuzzifier*.

Keanggotaan tiap atribut faktor resiko penyakit CAD dibagi menjadi 2 yaitu *low* dan *high*. Untuk prediksi penyakit CAD keanggotaannya dibagi dua menjadi *Present* dan *Absent*. Baik input dan output ini pada *low* dan *high* menggunakan fungsi keanggotaan trapesium. Beberapa contoh fungsi keanggotaan tiap input dan output ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Fungsi Keanggotaan Resting ECG (a) dan Fungsi Keanggotaan Prediksi CAD (b)

Fuzzy Inference Engine, Type Reducer dan Defuzzifier

Walaupun basis pengetahuan memiliki struktur yang tergantung pada keadaan kasus yang ingin diselesaikan tapi fuzzy inference engine tidak tergantung pada basis pengetahuan dan inference engine yang sama bisa digunakan pada kasus manapun. Sistem ini menggunakan inferensi Mamdani, center-of-sets type-reducer untuk mengubah IT2 FS ke IT1 FS dan *defuzzifier* menggunakan rata-rata dari nilai interval keluaran *type reducer* berdasarkan algoritma Karnik-Mendel (KM) [9].

5. Hasil dan Diskusi

Sistem logika fuzzy yang diusulkan diimplementasikan dengan pemrograman Java. Untuk menguji performa sistem dilakukan pengujian terhadap dataset statlog. Dataset statlog yang berisi 270 hasil observasi dibagi dua (50:50) menjadi dataset latih dan dataset uji. Pemisahan dilakukan secara acak.

Pengujian dilakukan 10 kali sehingga dilakukan 10 kali pemisahan acak data latih dan data uji, selanjutnya berdasarkan data latih dibuat FLS dan dihitung performanya masing-masing. Hasil pengukuran ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Performa Sistem Fuzzy

Uji	Sensitivitas	Spesifitas	Akurasi	Jml Rule	Uji	Sensitivitas	Spesifitas	Akurasi	Jml Rule
1	72.31	81.43	77.04	2	6	68.52	71.60	70.37	2
2	68.25	76.39	72.59	1	7	64.71	76.12	70.37	3
3	81.25	75.86	77.78	2	8	68.12	80.30	74.07	2
4	69.57	68.54	68.89	3	9	92.31	75.00	80.00	2
5	66.20	79.69	72.59	5	10	68.12	80.30	74.07	2

Contoh pada uji ke-3 sensitivitas sistem adalah 81.25 % berarti sistem yang dibangun dapat mendeteksi 81.25% pasien yang mengalami CAD dan melewati 18.75% pasien CAD. Sistem memiliki spesifitas 75.86%, dengan kata lain sekitar 66 dari 87 orang dengan hasil negatif adalah benar-benar negatif dan 21 orang terdiagnosis positif padahal tidak memiliki penyakit CAD.

Performa sistem yang ditunjukkan juga cukup baik dengan rata-rata tingkat akurasi 73.78%, sensitivitas 71.94% dan spesifitas 76.52% dengan hanya menggunakan rata-rata 2-3 rule dari JRip classifier. Rule yang digunakan juga hanya menggunakan sekitar 4 atribut faktor resiko CAD. Sehingga peluang untuk meningkatkan kinerja sistem masih terbuka luas baik dengan menambah rule, memperbaiki fungsi keanggotaan dengan optimasi keanggotaan, manajemen rule dan lain-lain.

Pengujian sistem juga baru diterapkan terhadap satu dataset, sistem masih perlu diujikan terhadap beberapa dataset selain dataset heart statlog.

6. Kesimpulan

Pada penelitian ini struktur *Interval Type-2 Fuzzy Logic System* untuk diagnosis *Coronary Artery Disease* telah dijabarkan. Sistem telah dikembangkan untuk deteksi dini penyakit CAD. Ketidakpastian dalam diagnosis CAD direpresentasikan dengan IT2 FLS. Fuzzy rule dihasilkan secara otomatis dengan bantuan JRip Weka. Terakhir sistem diujikan terhadap dataset heart statlog. Hasil sistem masih memiliki potensi untuk dikembangkan lebih jauh, hal ini tidak terlepas dari banyaknya opsi pemilihan metode-metode pengembangan komponen IT2 FLS.

7. Daftar Referensi

- [1] A. S. Go, D. Mozaffarian, V. L. Roger, E. J. Benjamin, J. D. Berry, M. J. Blaha, S. Dai, E. S. Ford, C. S. Fox, S. Franco, H. J. Fullerton, C. Gillespie, S. M. Hailpern, J. A. Heit, V. J. Howard, M. D. Huffman, S. E. Judd, B. M. Kissela, S. J. Kittner, D. T. Lackland, J. H. Lichtman, L. D. Lisabeth, R. H. Mackey, D. J. Magid, G. M. Marcus, A. Marelli, D. B. Matchar, D. K. McGuire, E. R. Mohler, C. S. Moy, M. E. Mussolino, R. W. Neumar, G. Nichol, D. K. Pandey, N. P. Paynter, M. J. Reeves, P. D. Sorlie, J. Stein, A. Towfighi, T. N. Turan, S. S. Virani, N. D. Wong, D. Woo, and M. B. Turner, "Executive summary: heart disease and stroke statistics--2014 update: a report from the American Heart Association.," *Circulation*, vol. 129, no. 3, pp. 399–410, Jan. 2014.
- [2] A. Omran, "Changing patterns of health and disease during the process of national development," *Heal. illness, Med. a Read. Med. Sociol.*, 1979.
- [3] D. Pal, K. M. Mandana, S. Pal, D. Sarkar, and C. Chakraborty, "Fuzzy expert system approach for coronary artery disease screening using clinical parameters," *Knowledge-Based Syst.*, vol. 36, pp. 162–174, 2012.
- [4] I. Maalej, C. Rekik, D. Ben, H. Abid, and N. Derbel, "Interval Type-2 Takagi-Sugeno-Kang Fuzzy Logic Approach for Three-Tank System Modeling," pp. 144–149, 2014.
- [5] D. Wu, "A Brief Tutorial on Interval Type-2 Fuzzy Sets and Systems," pp. 1–13, 2013.
- [6] P. Melin and O. Castillo, "A review on type-2 fuzzy logic applications in clustering , classification and pattern recognition," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 21, pp. 568–577, 2014.
- [7] P. K. Anooj, "Clinical decision support system : Risk level prediction of heart disease using weighted fuzzy rules," *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 24, no. 1, pp. 27–40, 2012.
- [8] N. A. Setiawan, P. A. Venkatachalam, and A. F. M. Hani, "Diagnosis of Coronary Artery Disease Using Artificial Intelligence Based Decision Support System," no. October, pp. 11–13, 2009.

- [9] J.M. Mendel, "Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions," Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.
- [10] T. Nguyen, A. Khosravi, D. Creighton, and S. Nahavandi, "EEG signal classification for BCI applications by wavelets and interval type-2 fuzzy logic systems," *Expert Syst. Appl.*, vol. 42, no. 9, pp. 4370–4380, 2015.
- [11] S. M. Darwish, "Soft computing applied to the build of textile defects inspection system," no. February, pp. 373–381, 2013.
- [12] J. L. Carmona, P., Castro, "Interpretability enhancement of fuzzy modeling using ant colony optimization," *Proc. First Int. Work. Genet. Fuzzy Syst.*, pp. 148–153, 2005.
- [13] H. Hagaras, "A hierarchical type-2 fuzzy logic control architecture for autonomous mobile robots," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 12, pp. 524–539, 2004.
- [14] H. Hagaras, "Type-2 FLCs: A new generation of fuzzy controllers," *IEEE Comput. Intell. Mag.*, vol. 2, pp. 30–43, 2007.