

Perancangan Sensor Gelembung Udara Fault Tolerant Menggunakan Metoda Triple Modular Redundancy

Noor Cholis Basjaruddin^{1,2}, Kuspriyanto¹, Yoga Priyana¹

¹Sekolah Teknik Elektro dan Informatika Institut Teknologi Bandung

²Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Bandung

Phone: +62-22-2013789 Email: ppmteam@gmail.com

Abstrak—Berbagai tindakan medis yang menggunakan *Extracorporeal Blood Circuits (ECBC)*, seperti hemodialisis, hemofiltrasi, dan *cardiopulmonary bypass* membutuhkan sensor untuk mendeteksi gelembung udara dalam darah. Oleh karena itu diperlukan sensor gelembung udara yang handal. Pada penelitian ini digunakan tiga sensor kapasitif untuk mewujudkan sensor gelembung udara fault tolerant. Metoda Triple Modular Redundancy (TMR) digunakan untuk memilih keluaran dari tiga sensor kapasitif yang dipasang pada selang darah. Modul TMR akan memilih nilai tengah dari tiga nilai keluaran sensor. Penerapan TMR akan mencegah kesalahan dalam pendeteksian gelembung udara akibat kegagalan kerja sensor.

Keywords: deteksi gelembung udara, triple modular redundancy, extracorporeal blood circuits

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang pesat terjadi di segala bidang tidak terkecuali pada teknologi yang digunakan dalam berbagai tindakan medis. Peralatan yang digunakan dalam hemodialisis (cuci darah), hemofiltrasi (terapi pengganti ginjal) atau *cardiopulmonary bypass* memerlukan pendeteksi gelembung udara dalam darah. Adanya gelembung udara dalam darah bisa menyebabkan reaksi lokal seperti *tissue ischemia* atau *necroses* yang kadang bisa berakibat fatal bagi pasien. Gelembung udara yang terdapat pada selang *extracorporeal* umumnya muncul pada saat pemasangan alat. Selain itu gelembung udara bisa terbentuk oleh pompa darah, adanya turbulensi aliran darah dalam selang dan saluran pembuluh darah, serta karena perbedaan suhu. Gelembung udara mikro saat ini diakui sebagai bahaya medis pada operasi jantung. Masuknya gelembung udara mikro ke dalam sistem pembuluh darah bisa berakibat fatal karena menutup jalannya darah ke jantung dan otak. Teknik pendeteksian gelembung udara ini bisa menggunakan sensor infra merah, sensor ultrasonic atau sensor kapasitor. Selain pendeteksian gelembung udara, juga dikembangkan penjebak gelembung udara (*air bubble trapper*).

II. METODE PENELITIAN

A. Sensor gelembung udara kapasitif

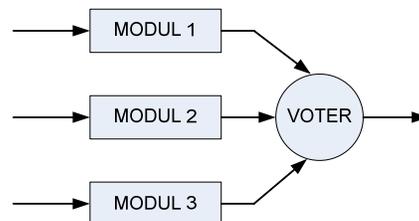
Karakteristik sensor kapasitif dari penelitian lain ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Pengukuran kapasitansi dan tegangan pada beberapa diameter gelembung udara yang berbeda ^[2]

Kapasitansi (nF)	Diameter gelembung udara (mm)	Tegangan keluaran (mV)
43.50	0	18.60
42.63	0.82	20.3
42.54	1.00	22.01
41.07	2.97	40.50
40.44	3.55	43.70
39.38	4.00	47.90

B. Triple Modular Redundancy (TMR)

Triple Modular Redundancy adalah metoda *fault tolerance* yang menggunakan tiga modul identik, bekerja bersamaan, serta mendapat sinyal masukan yang sama. Keluaran TMR adalah salah satu dari tiga keluaran modul yang dipilih dengan teknik *voting*. Diagram blok TMR dapat dilihat pada Gambar 1.

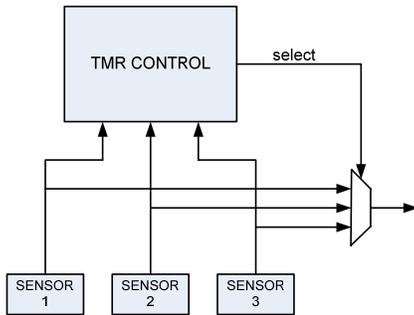


Gambar 1 Triple Modular Redundancy

C. Sensor fault tolerant menggunakan TMR

Sensor fault tolerant dapat direalisasikan dengan menggunakan berbagai metoda. Metoda paling sederhana adalah menggunakan 2 sensor, satu sensor sebagai sensor utama dan satu sensor lainnya sebagai cadangan (*backup*). Pada sistem kompleks digunakan banyak sensor yang membentuk sebuah matriks (*array*).

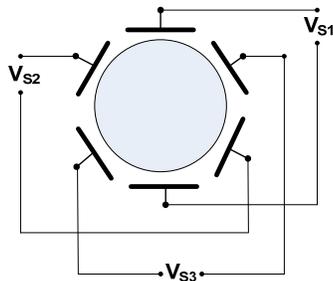
Pada penelitian ini digunakan metoda TMR untuk membentuk sensor fault tolerant. Diagram blok sistem ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Sensor fault tolerant menggunakan TMR

D. Pemasangan sensor

Penggunaan TMR pada sensor fault tolerant membutuhkan tiga sensor yang secara ideal sama dan dipasang sedemikian hingga ketiga sensor mengukur besaran yang sama dalam waktu yang sama. Contoh pemasangan sensor yang memenuhi kondisi tersebut dapat dilihat pada Gambar 3. Pada gambar terlihat tiga sensor kapasitif dipasang disekitar selang.



Gambar 3 Pemasangan tiga sensor kapasitif

E. Teknik Voting

Penentuan keluaran sensor fault tolerant dari tiga keluaran sensor dikenal sebagai *voting*. Teknik voting yang umum digunakan pada TMR adalah *majority vote*, *mid-value vote*, dan *the mean value vote*. Pada *majority vote*, keluaran sensor fault tolerant dipilih paling tidak dari dua keluaran sensor yang sama. Dengan kata lain, jika sebuah sensor rusak atau tidak berfungsi dengan semestinya maka keluaran sensor dipilih dari dua keluaran sensor yang lainnya.

Pada teknik *mid-value voting*, keluaran sensor terpilih adalah keluaran sensor yang merupakan nilai tengah (*median*) dari tiga keluaran sensor. Jika keluaran sensor merupakan rata-rata dari seluruh keluaran sensor maka teknik votingnya dikenal sebagai *mean value vote*.

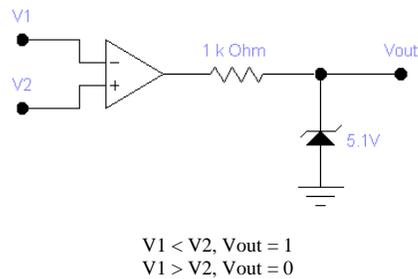
Pada penelitian ini dipilih teknik *mid-value voting* dengan pertimbangan teknik ini relatif lebih mudah untuk diimplementasikan.

F. Penentuan nilai tengah

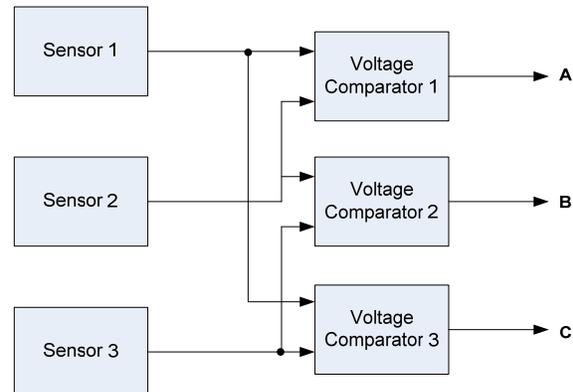
Penentuan nilai tengah dari tiga keluaran sensor dilaksanakan secara hardware dengan menggunakan komponen analog. Penggunaan komponen analog dapat menghemat biaya implementasi karena keluaran sensor adalah analog. Selain itu penggunaan komponen analog juga dapat mengurangi galat yang disebabkan karena proses digitalisasi. Rangkaian elektronik yang digunakan dalam proses penentuan nilai tengah terbagi atas dua bagian yaitu komparator dan multiplexer.

Bagian komparator

Pada bagian ini digunakan tiga rangkaian komparator dengan op-amp sebagai komponen utamanya. Gambar 4 menunjukkan rangkaian komparator tegangan, sedangkan Gambar 5 menunjukkan diagram blok bagian komparator.



Gambar 4 Rangkaian komparator tegangan



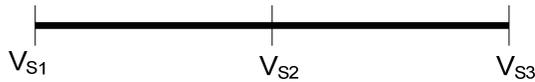
Gambar 5 Diagram blok komparator

Pada gambar 5, A, B, dan C adalah hasil perbandingan antara keluaran sensor 1 dan 2, 2 dan 3, serta 1 dan 3. Nilai A,B, dan C untuk kondisi bervariasi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Keluaran bagian komparator

Inputs	A	B	C
$V_{S1} < V_{S2}$	0	-	-
$V_{S1} > V_{S2}$	1	-	-
$V_{S2} < V_{S3}$	-	0	-
$V_{S2} > V_{S3}$	-	1	-
$V_{S1} < V_{S3}$	-	-	0
$V_{S1} > V_{S3}$	-	-	1

Berdasarkan pada Tabel 2, keluaran sensor fault tolerant dapat ditentukan dari nilai tengah. Sebagai contoh jika $A = 0, B = 0,$ dan $C = 0,$ artinya $V_{S1} < V_{S2}, V_{S2} < V_{S3},$ dan $V_{S1} < V_{S3}.$ Gambar 6 menunjukkan ilustrasi untuk keadaan ini.



Gambar 6 Nilai tengah dari keluaran sensor

V_{S2} adalah nilai tengah dari tiga keluaran sensor. Tabel 3 menunjukkan hasil dari pemilihan keluaran sensor menggunakan *mid value voting*.

Tabel 3 Pemilihan sensor

A	B	C	Sensor terpilih
0	0	0	S2
0	0	1	Tidak ada
0	1	0	S3
0	1	1	S1
1	0	0	S1
1	0	1	S3
1	1	0	Tidak ada
1	1	1	S2

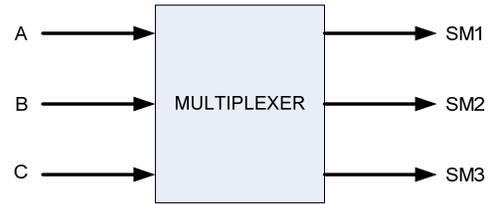
Bagian Multiplexer

Bagian ini memproses keluaran bagian komparator untuk digunakan dalam penentuan keluaran sensor terpilih. Multiplexer dirancang dengan mengacu pada Tabel 4 yang merupakan tabel kebenaran hasil pengembangan Tabel 3.

Tabel 4 Tabel kebenaran multiplexer

A	B	C	SM1	SM2	SM3
0	0	0	0	1	0
0	0	1	-	-	-
0	1	0	0	0	1
0	1	1	1	0	0
1	0	0	1	0	0
1	0	1	0	0	1
1	1	0	-	-	-
1	1	1	0	1	0

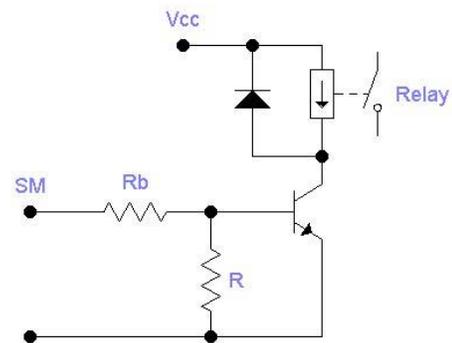
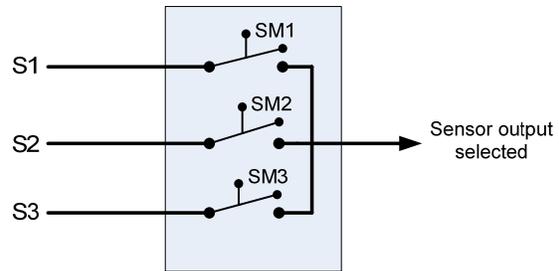
Nilai 1 pada kolom SM1, SM2, SM3 artinya keluaran sensor S1, S2, atau S3 terpilih sebagai nilai tengah. Berdasarkan pada Tabel 4 dapat dibuat multiplexer dengan 3 masukan dan 3 keluaran. Tiga keluaran multiplexer ini dapat digunakan untuk mengendalikan rangkaian selektor. Gambar 7 menunjukkan diagram blok multiplexer.



Gambar 7 Multiplexer 3 ke 3

G. Rangkaian selector

Rangkaian *selector* terdiri dari tiga transistor yang berfungsi sebagai saklar. Gambar 8(a) menunjukkan diagram blok dari *selector* dan Gambar 8(b) menunjukkan transistor sebagai saklar yang dapat dikendalikan oleh logik nol atau satu pada bagian masukannya. Jika logik 1 diberikan pada bagian masukan, maka transistor akan on dan keluaran sensor akan terpilih yang kemudian diolah pada bagian selanjutnya.

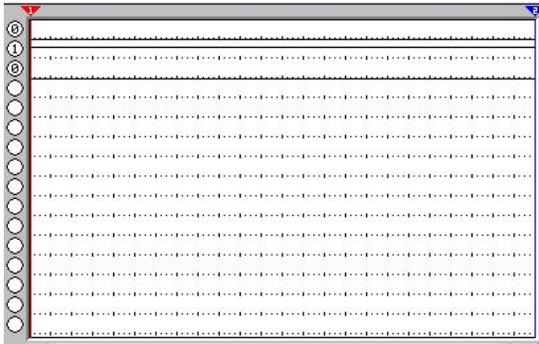


Gambar 8 Diagram blok selector (a) dan transistor sebagai saklar (b).

II.HASIL DAN PEMBAHASAN

H. Simulasi penentuan nilai tengah

Gambar 9 menunjukkan hasil simulasi penentuan nilai tengah.

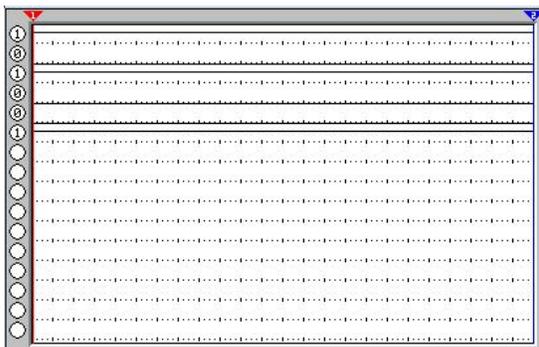


Gambar 9 Hasil simulasi penentuan nilai tengah

Simulasi ini menunjukkan bahwa penentuan nilai tengah dapat dikerjakan dengan menggunakan 3 komparator tegangan. Pada simulasi ini sensor 3 (S3) terpilih.

I. Simulasi Multiplexer

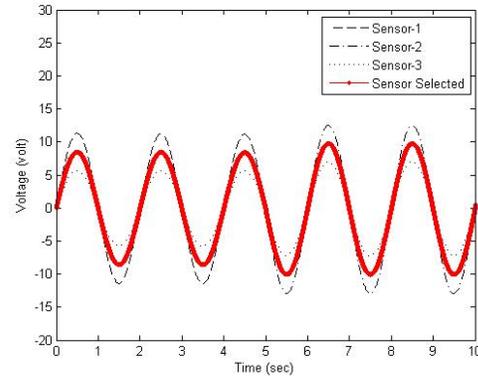
Gambar 10 menunjukkan salah satu dari hasil simulasi dengan masukan multiplexer 101 dan keluaran 001 (sensor 3 terpilih). Multiplexer pada simulasi ini menggunakan tiga gerbang NOT, enam gerbang AND, dan tiga gerbang OR.



Gambar 10 Simulasi multiplexer

J. Simulasi rangkaian selector

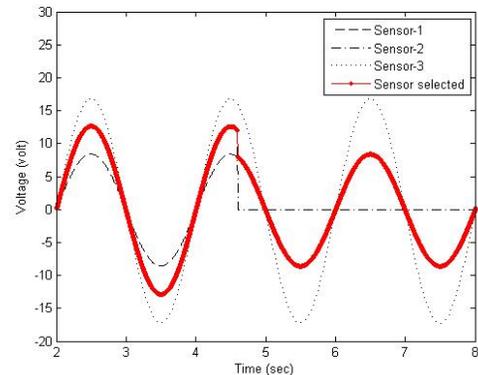
Gambar 11 menunjukkan hasil dari simulasi rangkaian selector. Pada awal simulasi, keluaran sensor fault tolerant adalah keluaran sensor 2. Keluaran sensor yang terpilih adalah nilai tengah dari seluruh keluaran sensor. Pada detik keenam keluaran sensor 2 (S2) naik dan lebih besar dibanding keluaran sensor 1 (S1). Sekarang sensor 1 menjadi nilai tengah dan terpilih sebagai keluaran sensor fault tolerant. Simulasi ini menunjukkan bahwa rangkaian selector dapat berfungsi dengan baik.



Gambar 11 Hasil simulasi rangkaian selector

K. Simulasi kegagalan sensor

Pada simulasi ini sensor 2 (S2) mengalami kerusakan. Gambar 12 menunjukkan bahwa sekitar detik ke 4,6, sensor 2 gagal bekerja (rusak), sebagai konsekuensinya voter harus memilih keluaran sensor lainnya. Pada kasus ini sensor 1 (S1) terpilih. Simulasi ini menunjukkan bahwa keandalan sensor fault tolerant lebih tinggi dibanding sensor tunggal.



Gambar 12 Simulasi rangkaian selector

Pada simulasi C dan D keluaran tiga sensor sengaja dibedakan secara jelas dengan tujuan untuk mempermudah pengamatan. Simulasi dikerjakan dengan piranti lunak Electronics Workbench (EWB) dan hasilnya diproses dengan Matlab.

L. Analisis keandalan sensor fault tolerant

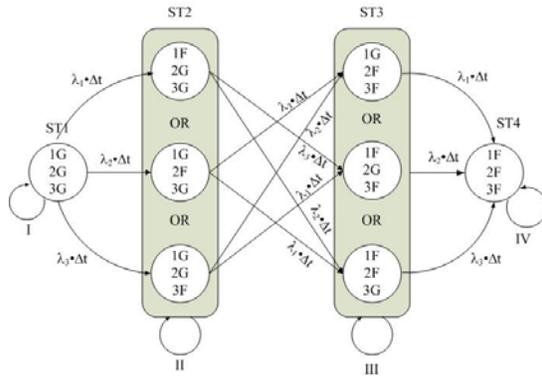
Penggunaan TMR pada sensor fault tolerant akan menaikkan keandalan sistem. Kegagalan sensor fault tolerant terjadi jika dua atau lebih sensor mengalami kerusakan. Ketika hanya satu sensor yang gagal bekerja maka sensor fault tolerant masih tetap dapat beroperasi.

Metoda analisis Markov dapat digunakan untuk menganalisis keandalan sensor fault tolerant. Kondisi tiap sensor adalah baik (*good*, G) dan rusak (*fail*, F). Oleh karena itu untuk tiga sensor terdapat 6 kondisi yaitu 1G, 1F, 2G, 2F, 3G dan 3F. Arti dari 1G adalah

sensor 1 baik. State yang mungkin terjadi pada sensor fault tolerant adalah:

- State 1 (ST1) : 1G2G3G
- State 2 (ST2) : 1F2G3G atau 1G2F3G atau 1G2G3F
- State 3 (ST3) : 1G2F3F atau 1F2G3F atau 1F2F3G
- State 4 (ST4) : 1F2F3F

Jika tiap sensor mempunyai laju kegagalan (*failure rate*) sebesar λ , maka probabilitas transisi menuju kegagalan adalah $\lambda \cdot \Delta t$. Sehingga probabilitas transisi sensor 1, 2, dan 3 adalah $\lambda_1 \cdot \Delta t$, $\lambda_2 \cdot \Delta t$, dan $\lambda_3 \cdot \Delta t$. Model Markov sensor fault tolerant dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13 Model Markov sensor fault tolerant

I. Probabilitas tetap pada ST1

$$P1(t+\Delta t) = P1(t) \cdot [1 - \lambda_A \Delta t] \tag{1}$$

dengan,

$$\lambda_A = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$$

II. Probabilitas tetap pada ST2

$$P2(t+\Delta t) = P1(t) \cdot \lambda_A \Delta t + P2(t) \cdot [1 - \lambda_B \Delta t] \tag{2}$$

dengan,

$$\lambda_B = 2\lambda_1 + 2\lambda_2 + 2\lambda_3$$

III. Probabilitas tetap pada ST3

$$P3(t+\Delta t) = P2(t) \cdot \lambda_B \Delta t + P3(t) \cdot [1 - \lambda_C \Delta t] \tag{3}$$

dengan,

$$\lambda_C = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$$

IV. Probabilitas tetap pada ST4

$$P4(t+\Delta t) = P3(t) \cdot \lambda_C \Delta t + P4(t) \tag{4}$$

Persamaan 1 – 4 kemudian diatur ulang dan menjadi,

$$\begin{aligned} [P1(t+\Delta t) - P1(t)]/\Delta t &= -\lambda_A \cdot P1(t) \\ [P2(t+\Delta t) - P2(t)]/\Delta t &= \lambda_A \cdot P1(t) - \lambda_B \cdot P2(t) \\ [P3(t+\Delta t) - P3(t)]/\Delta t &= \lambda_B \cdot P2(t) - \lambda_C \cdot P3(t) \\ [P4(t+\Delta t) - P4(t)]/\Delta t &= \lambda_C \cdot P3(t) \end{aligned}$$

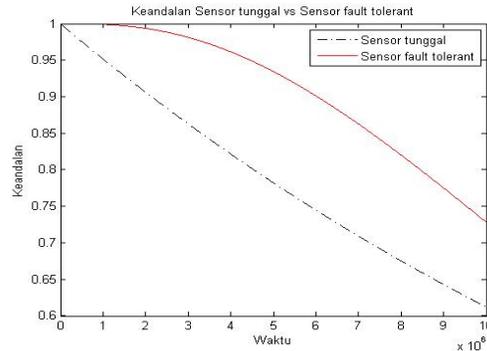
Atau untuk $\Delta t \rightarrow 0$

$$\begin{aligned} dP1(t)/dt &= -\lambda_A \cdot P1(t) \\ dP2(t)/dt &= \lambda_A \cdot P1(t) - \lambda_B \cdot P2(t) \\ dP3(t)/dt &= \lambda_B \cdot P2(t) - \lambda_C \cdot P3(t) \\ dP4(t)/dt &= \lambda_C \cdot P3(t) \end{aligned}$$

dalam bentuk matriks menjadi,

$$\begin{bmatrix} dP1(t)/dt \\ dP2(t)/dt \\ dP3(t)/dt \\ dP4(t)/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_A & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_A & -\lambda_B & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_B & -\lambda_C & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P1(t) \\ P2(t) \\ P3(t) \\ P4(t) \end{bmatrix}$$

Model sensor fault tolerant dalam bentuk matriks tersebut selanjutnya disimulasikan dan diperoleh kurva keandalan Gambar 14.



Gambar 14 Kurva keandalan sensor fault tolerant dan sensor tunggal

Gambar 14 menunjukkan bahwa sensor fault tolerant dengan TMR mempunyai keandalan lebih tinggi dibanding sensor tunggal.

M. Akurasi Sensor

Selain meningkatkan keandalan, sensor redundan juga meningkatkan akurasi sensor. Pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa keluaran sensor merupakan nilai tengah dari tiga keluaran sensor, artinya keluaran dipilih pada nilai yang mendekati rata-rata dari ketiga keluaran sensor. Pemilihan keluaran sensor dengan teknik ini akan meningkatkan akurasi sensor. Ketika keluaran sensor tiba-tiba naik, pada Gambar 11 ditunjukkan pada keluaran sensor 2, secara otomatis sensor fault tolerant akan mengganti keluaran sensor dengan yang lain. Mekanisme ini akan mencegah sensor dari pembacaan yang tidak tepat.

II.KESIMPULAN

Sensor fault tolerant menggunakan metoda TMR mempunyai keandalan lebih baik dibanding sensor tunggal. Keandalan sensor sangat dibutuhkan oleh peralatan yang penting seperti peralatan kedokteran. Pemilihan keluaran sensor dengan teknik nilai tengah dapat diimplementasikan dengan menggunakan komponen analog dan digital serta relatif murah dari sisi biaya. Keuntungan lain dari sensor fault tolerant dengan menggunakan TMR adalah meningkatnya keakuratan sensor.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Barak, M., and Katz, Y., *Microbubbles Pathophysiology and Clinical Implications*, Chest, vol.128 pp.2918- 2932, 2005.
- [2] Mawahib Gafare Abdalrahman Ahmed, Abdallah Belal Adam, John Ojur Dennis, and Gail Sylvia Steele, *Capacitor Device for Air Bubbles Monitoring*, International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS Vol: 9 No: 10, 2009.
- [3] Mark Stringham, B.S., M.S., P.E., *Reliability Analysis of Moog Ultrasonic Air Bubble Detectors*, Moog, Inc., 2009.
- [4] Mawahib Gafare Abdalrahman, Abdallah Bellal Adam, and John Ojur Dennis, *Capacitive Air Bubble Detector for Moving Blood in Artificial Kidney*, The 3rd International Symposium on Biomedical Engineering (ISBME 2008), 2008
- [5] Ruzairi Abdul Rahim, Ng Wei Nyap, Mohd Hafiz Fazalul Rahiman, and Chan Kok San, *Determination of Water and Oil Flow Composition Using Ultrasonic Tomography*, Elektrika, Vol. 9, No. 1, pp.19-23, Faculty of Electrical Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 2007.
- [6] Johnson et.al, *Method and Aparatus for Ultrasonic Detection of Air Bubbles*, United States Patent, 1995
- [7] Mawahib Gafare Abdalrahman, Abdallah Bellal Adam, and John Ojur Dennis, *Capacitive Air Bubble Detector Operated at Different Frequencies for Application in Hemodialysis*, World Academy of Science, Engineering and Technology 50, 2009.
- [8] M. D. Krstic, M. K. Stojcev, G. Lj. Djordjevic, and I. D. Andrejic, *A Mid-Value Select Voter*, Faculty of Electronic Engineering, University of Nis, Beogradska 14, 18000 Nis, Serbia & Montenegro, *Microelectronics and Reliability* Volume 45, Issues 3-4, March-April 2005, Pages 733-738
- [9] Carl Carmichael, *Triple Module Redundancy Design Techniques for Virtex FPGAs*, XAPP197 (v1.0.1), 2006.
- [10] Georg Brasseur, *Design Rules for Robust Capacitive Sensors*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 52, No. 4, 2003.
- [11] Richard Spillman, *Lecture 26 – Alternative Architectures*, Pacific Lutheran University.