

# Redundant Capacitive Sensor untuk Pendeteksi Gelembung Udara *Fault Tolerance*

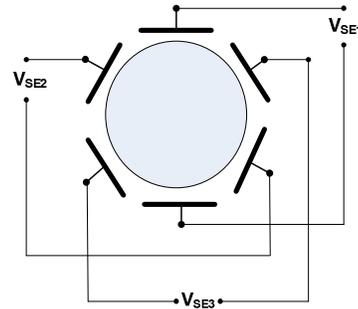
Noor Cholis BASJARUDDIN

Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir, Ds. Ciwaruga Kotak Pos 1234 Bandung 40012, Phone: +62-22-2013789  
ppmteam@gmail.com

**Abstract** - Detection of air bubbles in the blood is important for various medical treatments that use Blood Extracorporeal Circuits (ECBC), such as hemodialysis, hemofiltration, and cardio pulmonary bypass. Therefore we need a reliable detection of air bubbles. In this research designed capacitive redundant sensors for detecting air bubbles fault tolerance. A Triple Modular Redundancy (TMR) method is used to select the output capacitor of the three sensors mounted on the blood hose. TMR module will choose the middle of three sensors output value. Application of TMR will prevent errors in the detection of air bubbles resulting from the failure of the sensor.

**Keywords**- air bubble detection, triple modular redundancy (TMR), extracorporeal blood circuits



Gambar 1. Tiga Sensor Kapasitif

## 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 yang saat ini ada menggunakan sensor infra merah, sensor *ultrasonic* atau sensor kapasitor.

## II. METODOLOGI PENELITIAN

### A. Sensor Gelembung Udara Kapasitif

Pada perancangan ini digunakan tiga sensor gelembung udara kapasitif seperti tampak pada Gambar 1.

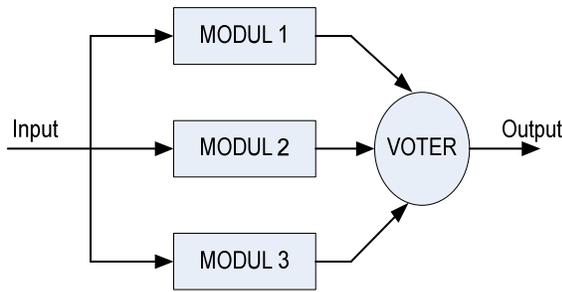
Tiga sensor dipasang mengitari selang *extracorporeal* dan akan mengukur gelembung udara secara bersamaan.  $V_{SE1}$ ,  $V_{SE2}$ , and  $V_{SE3}$  adalah keluaran sensor. Karakteristik sensor kapasitif dapat dilihat pada Tabel 1.

TABEL 1.  
TEGANGAN DAN KAPASITANSI TERUKUR UNTUK DIAMETER GELEMBUNG UDARA BERBEDA<sup>[1]</sup>

Kapasitansi (nF)	Diameter gelembung (mm)	Keluaran tegangan (mV)
43.50	0	18.60
42.63	0.82	20.30
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 untuk mewujudkan sistem *fault tolerant* dengan menggunakan tiga modul yang sama, bekerja bersamaan, dan mendapatkan sinyal masukan yang sama. Keluaran modul TMR adalah salah satu dari tiga keluaran modul yang dipilih dengan teknik *voting*. Misalkan jika 1 keluaran modul berbeda dengan 2 keluaran modul yang lain, maka yang dianggap benar adalah 2 keluaran modul yang sama. Diagram blok TMR dapat dilihat pada Gambar 2.

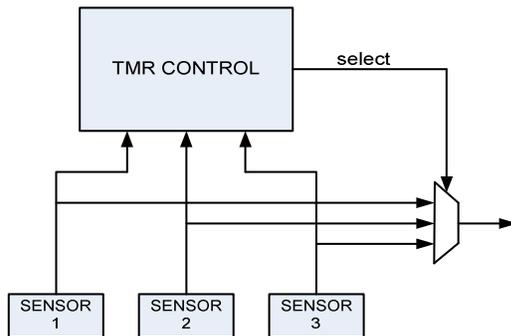


Gambar 2. Diagram Blok TMR

Voter adalah bagian yang memilih salah satu dari tiga keluaran modul. Keluaran modul yang terpilih akan diproses pada tahap selanjutnya.

C. Redundant Sensor Menggunakan TMR

Redundant sensor untuk meningkatkan keandalan sistem pada bagian sensor bisa diwujudkan dengan berbagai metoda. Metoda yang paling sederhana adalah menggunakan dua sensor, satu sensor utama dan satu sensor cadangan. Redundant sensor yang kompleks bisa diwujudkan dengan menggunakan banyak sensor dalam bentuk matriks (sensor array). Pada penelitian ini dikembangkan redundant sensor menggunakan TMR. Diagram blok sistem yang akan dikembangkan dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Redundant Sensor dengan Metoda TMR

D. Teknik Voting

Pada metoda TMR penentuan keluaran sensor yang akan diproses selanjutnya dikenal sebagai voting. Bagian yang melakukan voting dikenal sebagai voter.

Teknik voting yang biasa digunakan pada TMR antara lain majority vote, mid-value vote, dan mean value vote. Pada majority vote keluaran sensor yang dipilih ditetapkan minimal dari dua keluaran sensor yang sama, artinya jika satu sensor mati atau tidak berfungsi dengan baik, maka keluaran sensor yang dipilih didasarkan pada dua keluaran sensor yang lain.

Pada teknik mid-value vote keluaran sensor yang dipilih adalah keluaran sensor yang nilainya merupakan nilai tengah (median) dari tiga nilai keluaran sensor. Keluaran sensor yang dipilih bisa juga didasarkan pada nilai rata-rata dari seluruh keluaran sensor, teknik ini dikenal sebagai teknik mean value vote.

Pada penilitan ini dipilih teknik voting berdasarkan nilai tengah. Pertimbangannya adalah teknik ini mudah diimplementasikan secara analog.

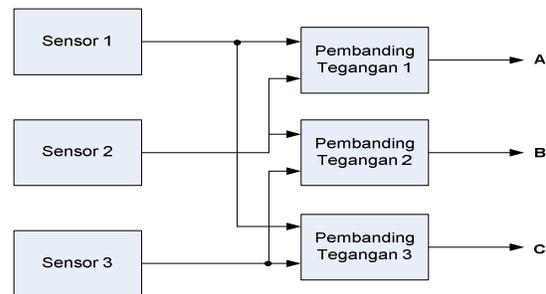
E. Penentuan Nilai Tengah

Penentuan nilai tengah dari keluaran sensor dilakukan secara hardware dengan komponen analog. Penggunaan komponen analog bisa menghemat biaya implementasi karena keluaran sensor yang dipakai umumnya adalah sinyal analog. Selain itu penggunaan komponen analog bisa mengurangi galat yang disebabkan oleh proses digitalisasi jika digunakan komponen digital.

Rangkaian untuk menentukan nilai tengah terbagi atas dua bagian utama. Bagian pertama adalah bagian pembanding dan bagian kedua adalah multiplexer.

Bagian Pembanding

Pada bagian ini digunakan tiga rangkaian pembanding tegangan dengan komponen utama op-amp. Gambar 4 menunjukkan diagram blok pembanding.



Gambar 4. Diagram Blok Pembanding

Pada rangkaian ini keluaran A, B dan C masing-masing adalah hasil pembandingan antara keluaran sensor 1 dan 2, 2 dan 3, serta 1 dan 3. Nilai keluaran A, B, dan C untuk berbagai kondisi ditunjukkan pada Tabel 2.

TABEL II  
KELUARAN RANGKAIAN PEMBANDING

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 Tabel 2 maka dapat ditentukan keluaran sensor yang merupakan nilai tengah. Sebagai contoh jika  $A = 0$ ,  $B = 0$ , dan  $C = 0$ , artinya  $V_{S1} < V_{S2}$ ,  $V_{S2} < V_{S3}$ , dan  $V_{S1} < V_{S3}$ . Nilai tegangan keluaran sensor 2 merupakan nilai tengah dan dipilih untuk diproses pada tahap selanjutnya. Tabel 3 menunjukkan hasil pemilihan keluaran sensor dengan menggunakan nilai tengah.

TABEL III  
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

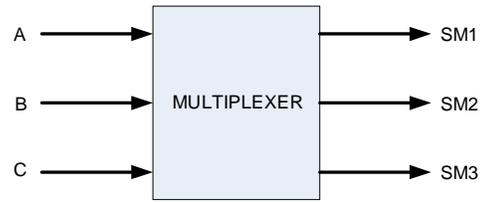
Bagian ini berfungsi untuk mengolah keluaran rangkaian pembanding agar bisa digunakan untuk menentukan keluaran sensor terpilih secara hardware. *Multiplexer* dirancang dengan berpedoman pada Tabel 4 yang merupakan tabel kebenaran hasil pengembangan dari Tabel 3.

TABEL IV  
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, atau SM3 artinya keluaran sensor S1, S2, atau S3 terpilih sebagai nilai tengah.

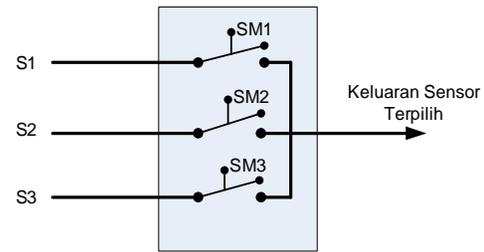
Berdasarkan Tabel 4 bisa dibuat multiplexer dengan 3 masukan dan 3 keluaran. Tiga keluaran multiplexer ini selanjutnya bisa digunakan untuk mengendalikan rangkaian pemilih (*selector circuit*). Gambar 5 menunjukkan diagram blok multiplexer.



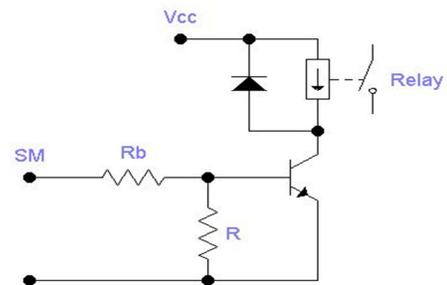
Gambar 5. Multiplexer 3 Masukan 3 Keluaran

F. Rangkaian Pemilih (*selector circuit*)

Rangkaian pemilih disusun atas tiga transistor yang berfungsi sebagai saklar. Gambar 6(a) menunjukkan diagram blok pemilih dan Gambar 6(b) menunjukkan transistor sebagai saklar yang bisa dioperasikan dengan memberikan logika nol atau satu pada bagian masukannya. Jika logika 1 diberikan pada bagian masukan maka transistor akan menjadi on, dan keluaran sensor yang terhubung akan dipilih untuk pemrosesan selanjutnya.



(a)



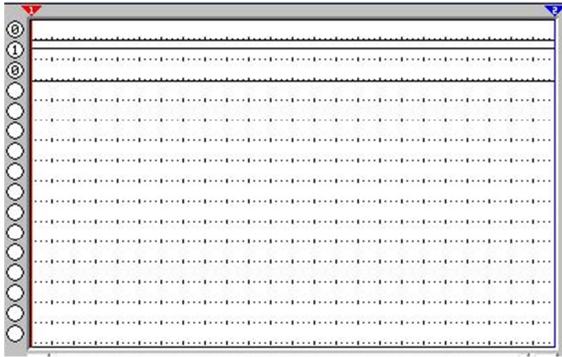
(b)

Gambar 6. Diagram Blok Rangkaian Pemilih (a) Transistor Sebagai Saklar (b)

**III. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**A. Simulasi Penentuan Nilai Tengah**

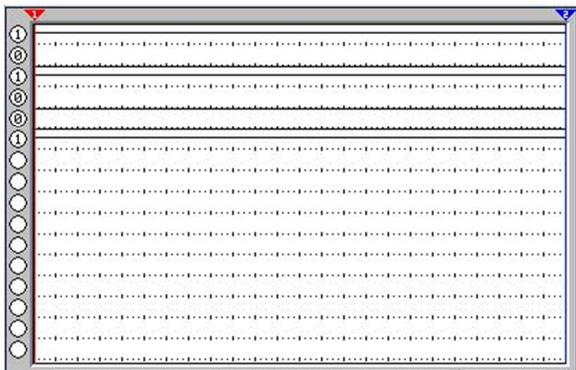
Gambar 7 menunjukkan simulasi penentuan nilai tengah dengan keluaran sensor 3 terpilih sebagai nilai tengah. Simulasi ini menunjukkan bahwa penentuan nilai tengah bisa dilakukan dengan menggunakan 3 pembanding tegangan.



**Gambar 7. Simulasi Penentuan Nilai Tengah**

**B. Simulasi Multiplexer**

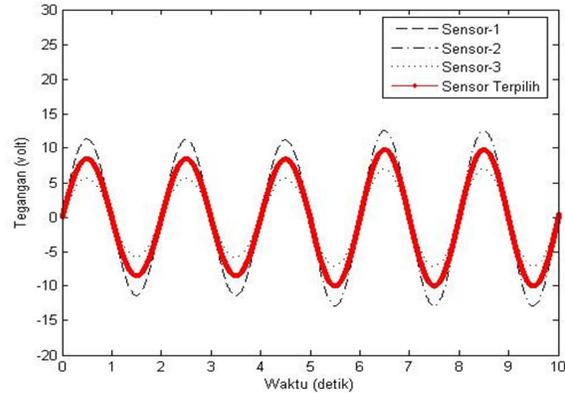
Gambar 8 menunjukkan salah satu dari hasil simulasi multiplexer dengan masukan 101 dan keluaran 001 (sensor 3 terpilih). Multiplexer pada simulasi ini menggunakan 3 gerbang NOT, 6 gerbang AND dan 3 gerbang OR.



**Gambar 8. Simulasi Multiplexer**

**C. Simulasi Rangkaian Pemilih**

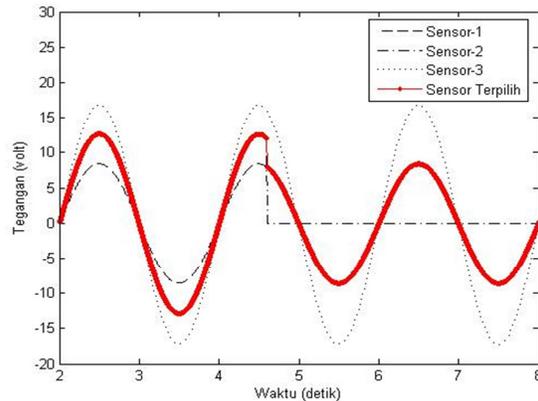
Gambar 9 menunjukkan hasil simulasi rangkaian pemilih. Keluaran sensor terpilih pada awal simulasi ini adalah keluaran sensor 2. Dapat dilihat keluaran sensor terpilih adalah nilai tengah dari seluruh keluaran sensor. Pada detik ke 6 keluaran sensor 2 mengalami kenaikan melebihi keluaran sensor 1, akibatnya nilai tengahnya menjadi keluaran sensor 1 dan keluaran sensor terpilih menjadi keluaran sensor 1. Simulasi ini menunjukkan bahwa rangkaian pemilih dapat berfungsi dengan baik.



**Gambar 9. Simulasi Rangkaian Pemilih**

**D. Simulasi Kegagalan Sensor**

Pada bagian ini disimulasikan kegagalan sensor, dalam hal ini adalah sensor 2. Gambar 10 memperlihatkan bahwa sebelum terjadi kegagalan keluaran sensor yang terpilih adalah keluaran sensor 2. Pada sekitar detik ke 4,6 sensor 2 mengalami kegagalan kerja, akibatnya voter harus memilih keluaran sensor yang lain. Keluaran sensor 1 terpilih setelah sensor 2 mengalami kegagalan. Simulasi ini menunjukkan bahwa keandalan pendeteksi gelembung udara yang menggunakan *redundantsensor* lebih tinggi dibanding tanpa menggunakan *redundantsensor*. Pada pendeteksi gelembung udara tanpa *redundant sensor*, ketika sensor gagal bekerja maka pendeteksi tersebut juga gagal bekerja. Hal tersebut tidak terjadi pada pendeteksi gelembung udara yang menggunakan *redundant sensor*.



**Gambar 10. Simulasi Kegagalan Sensor**

Untuk tujuan pengamatan tiga keluaran sensor sengaja diatur mempunyai perbedaan yang cukup besar. Simulasi dilakukan dengan bantuan piranti lunak Electronics Workbench (EWB) dan hasilnya kemudian diolah dengan piranti lunak Matlab.

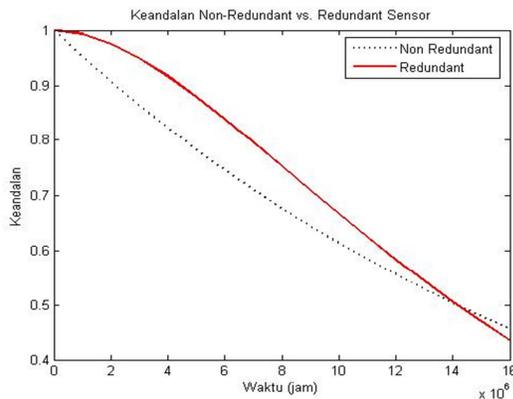
### E. Keandalan Sistem

Penggunaan TMR pada *redundant sensor* akan menaikkan keandalan sistem. Kegagalan pada sistem ini terjadi jika dua atau lebih sensor rusak. Ketika hanya satu sensor yang gagal bekerja maka sistem tetap bisa bekerja. Keandalan *redundant sensor* bisa dibandingkan dengan keandalan satu sensor dengan asumsi rangkaian *voter* tidak mengalami kerusakan.

Jika keandalan sistem dengan satu sensor adalah  $R_N$ , maka keandalan *redundant sensor* dengan menggunakan TMR adalah  $R_{TMR}$  yang diberikan sebagai,

$$R_{TMR} = R_N^3 + 3R_N^2(1-R_N) = 3R_N^2 - 2R_N^3 \quad (1)$$

Persamaan diatas diturunkan dari probabilitas keberhasilan kerja TMR. Keandalan sensor ( $R_N$ ) bisa dihitung dari MTBF sensor yang umumnya terdapat pada *datasheet* komponen elektronik. Gambar 11 menunjukkan perbandingan kurva keandalan antara pendeteksi gelembung udara dengan *redundant sensor* dan tanpa *redundant sensor*. Pada gambar terlihat kurva keandalan *redundant sensor* diatas kurva keandalan sensor tanpa *redundant*. Hal ini menunjukkan keandalan *redundant sensor* lebih tinggi dibanding keandalan sensor tanpa *redundant*.



Gambar 11. Kurva keandalan Non Redundant Sensor dan Redundant Sensors dengan TMR

Parameter lain untuk mengevaluasi keandalan sistem adalah *reliability improvement factor* atau RIF yang merupakan perbandingan kemungkinan kegagalan pada sistem *non-redundant* terhadap sistem *redundant* pada waktu kerja tertentu. Jika  $R_N$  dan  $R_R$  adalah keandalan *non-redundant system* dan *redundant systems* maka,

$$RIF = \frac{1 - R_N}{1 - R_{TMR}} \quad (2)$$

Jika diasumsikan laju kegagalan sensor adalah 0.049 kegagalan/10<sup>6</sup> jam dan *fixed mission time*  $t = 3.10^6$ , maka keandalan sensor adalah  $R_N = e^{-\lambda t} = e^{-(0.049)(3)} = 0.8633$ . Jika digunakan *redundant sensor* maka keandalannya naik menjadi  $R_{TMR} = 0.9490$ . Nilai RIF pada contoh ini adalah 2.6804.

### F. Ketelitian Sensor

Selain meningkatkan keandalan, *redundant sensor* juga meningkatkan ketelitian sensor. Pada gambar 9 dapat dilihat bahwa dari tiga keluaran sensor dipilih satu keluaran sensor yang merupakan nilai tengah. Pemilihan keluaran sensor yang merupakan nilai tengah tentunya dapat menaikkan ketelitian sensor secara keseluruhan. Ketika keluaran sensor tiba-tiba naik, misal pada gambar 10 terjadi pada keluaran sensor 2, maka keluaran sensor yang terpilih diganti dengan keluaran sensor yang lain. Mekanisme ini akan menghindarkan sistem dari pembacaan sensor yang salah atau dengan kata lain ketelitian menjadi lebih tinggi.

## IV. PENUTUP

Keandalan sistem instrumentasi dapat diperbaiki pada bagian sensornya. Redundant sensor menggunakan konfigurasi TMR terbukti bisa meningkatkan keandalan pendeteksi gelembung udara.

Pemilihan keluaran sensor dengan menggunakan teknik pemilihan nilai tengah dapat direalisasikan secara hardware menggunakan komponen analog dan digital.

Selain meningkatkan keandalan, *redundant sensor* dengan konfigurasi TMR juga meningkatkan ketelitian sensor.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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.
- [2] 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
- [3] Mark Stringham, B.S., M.S., P.E., *Reliability Analysis of Moog Ultrasonic Air Bubble Detectors*, Moog, Inc., 2009.
- [4] Carl Carmichael, *Triple Module Redundancy Design Techniques for Virtex FPGAs*, XAPP197 (v1.0.1), 2006.
- [5] Richard Spillman, *Lecture 26 - Alternative Architectures*, Pacific Lutheran University.
- [6] A. Namazi, S. Askari and M. Nourani, *Highly Reliable A/D Converter Using Analog Voting*, IEEE, 2008