

KARAKTERISASI ELEKTRODA BIOCHIP-G IMOLA-IVD MENGUNAKAN LARUTAN PHOSPATE BUFFER SALINE SEBAGAI SENSOR pO_2 PADA DETEKSI PENCEMARAN AIR

Lazuardi Umar¹, Valendry Harvenda¹, Joachim Wiest²

¹Jurusan Fisika FMIPA Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia

²cellasys GmbH - R&D, Lehrstuhl für Medizinische Elektronik TU München, Germany

email: lazuardi@unri.ac.id

ABSTRAK

Pencemaran air akan menurunkan tingkat kualitas air dan berbahaya jika air tersebut digunakan sebagai kebutuhan hidup sehari-hari. Pencemaran ini dapat dideteksi dengan mengamati parameter pencemar seperti tingkat oksigen terlarut (*dissolved oxygen*, pO_2). Oleh karena itu, telah dilakukan pengukuran parameter pencemar menggunakan metode elektrokimia menggunakan elektroda amperometris. Dalam proses pengukuran digunakan elektroda potensiometris dalam ukuran mikro yang disebut Biochip. Metode pengukuran ini mampu melakukan proses pengukuran langsung (*real time measurement*) dan memiliki mobilitas tinggi untuk mencapai lokasi sampel kontaminan. Komponen Biochip-C dikarakterisasi dengan menggunakan larutan standar yaitu *Phosphate Buffer Saline* (PBS) 2.3 Molar dengan pH 7.3 dan 8.3 yang terintegrasi dengan perangkat IMOLA-IVD. Hasil pengukuran dengan menggunakan larutan PBS menunjukkan respon dari elektroda Biochip berupa perubahan tegangan berdasarkan perubahan kondisi elektroda biochip.

Kata kunci: pencemaran air, biochip, larutan PBS, oksigen terlarut, amperometris.

ABSTRACT

Water pollution will reduce the quality of water and very harmful if it is used for daily consumption. This contamination can be detected by observing the pollutant parameters such as the ambient of dissolved oxygen (pO_2). Therefore, the measurement of pollutant parameters has been carried out using an electrochemical method using amperometric electrodes. In the measurement process, the micro sized electrode amperometric called biochips was used. This measurement method is able to perform direct measurements (real time measurement). Biochip-C component is characterized by using a standard solution namely Phosphate Buffer Saline (PBS) 2.3 Molar with pH 7.3 and 8.3 integrated with IMOLA-IVD devices. The measurement results using PBS solution showed a response in the form of electrodes biochips voltage changes based on changes in the condition of the electrode biochip.

Keywords: Water pollution, biochip, PBS solution, dissolved oxygen, amperometric

I. LATAR BELAKANG

Air adalah bagian penting dari kehidupan masyarakat di Provinsi Riau, Indonesia. Sebagai salah satu sumber daya alam, pencemaran air akan mempengaruhi peluang pengembangan ekonomi di masyarakat dan negara dari daerah sekitarnya. Polusi air diindikasikan sebagai penurunan kualitas air sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan air tidak dapat berfungsi sebagaimana dimaksud (Agustiningsih, 2012). Pencemaran air disebabkan oleh limbah-limbah yang masuk langsung ke dalam air seperti limbah industri, limbah rumah tangga dan limbah pertanian. Tingkat pencemaran air yang terjadi dapat diukur dengan mengamati perubahan parameter pencemaran air, salah satu parameter pencemaran air adalah tingkat oksigen terlarut (*dissolved oxygen*, pO_2) dalam air (Azwir, 2006; cellasys, 2013).

Langkah pencegahan perlu dilakukan untuk mengurangi dampak pencemaran air, yaitu dengan melakukan monitoring kualitas air. Proses monitoring kualitas air dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat *Intelligent Mobile Lab in Vitro Diagnostic* (IMOLA-IVD) yang mengambil konsep *Lab On Chip* yang bertujuan untuk menyederhanakan area proses pengumpulan data sampel (Salmin, 2005; Staudacher, 2010). Perangkat IMOLA-IVD mampu melakukan pengukuran multi parametrik sebagai yaitu oksigen terlarut (pO_2), suhu, derajat keasaman (pH) dan impedansi secara bersamaan.

Penelitian ini menggunakan perangkat IMOLA-IVD menggunakan komponen Biochip-C sebagai elektroda pengukuran parameter fisis. Proses karakterisasi Biochip-C bertujuan untuk mengetahui kondisi elektroda pengukuran sebelum digunakan dalam pengambilan data pencemaran air. Karakterisasi dilakukan dengan menggunakan larutan uji standar Phosphate Buffer Saline pH 7.3 dengan tingkat Molaritas sebesar 2,3 Molar. Hasil pengukuran dengan menggunakan larutan PBS

menunjukkan respon dari elektroda Biochip-C berupa perubahan tegangan berdasarkan perubahan kondisi elektroda biochip.

II. METODOLOGI

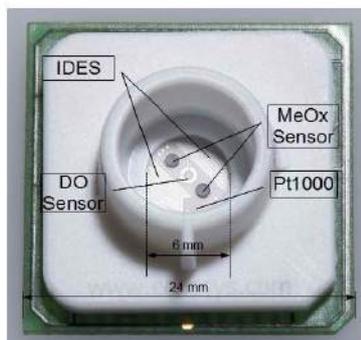
Penelitian dilakukan dengan menggunakan perangkat IMOLA-IVD yang terdapat pada perusahaan biomedik cellasys GmbH F-E yang merupakan spin off Technische Universitaet Muenchen Jerman. Karakterisasi bertujuan untuk mengetahui kondisi kelayakan dari elektroda pengukuran Biochip-C. Adapun bahan dan alat yang dipergunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

a. Larutan Phosphate Buffer Saline

Larutan *Phosphate Buffer Saline* (PBS) merupakan larutan penyangga yang tersusun dari campuran antara Senyawa Garam dan Senyawa Asam yang membentuk larutan elektrolit dengan kandungan ion phosphate (PO_4^{3-}) di dalamnya. Larutan PBS merupakan larutan pengujian standar dengan penggunaan dalam bidang Biologi dan Kimia. Dalam proses karakterisasi digunakan larutan PBS dengan spesifikasi pH 7.3 dan tingkat Molaritas sebesar 2.3 Molar

b. Biochip –C

Sistem sensor yang dimiliki IMOLA-IVD merupakan kumpulan elektroda-elektroda sensor berada dalam satu paket 207microchip sensor yang disebut *lab on chip*. Elektroda-elektroda sensor tersebut memiliki fungsi tersendiri yang bergantung pada parameter fisis yang dibaca, yaitu sensor DO sebagai elektroda pengukuran tingkat Oksigen terlarut (amperometris), sensor Metal Oksida sebagai elektroda pengukuran pH (potensiometris), sensor Pt1000 sebagai elektroda pengukuran suhu dan sensor impedansi (*Interdigitated Electrode Sensor-IDES*) sebagai elektroda pengukuran impedansi seperti pada Gambar 1.

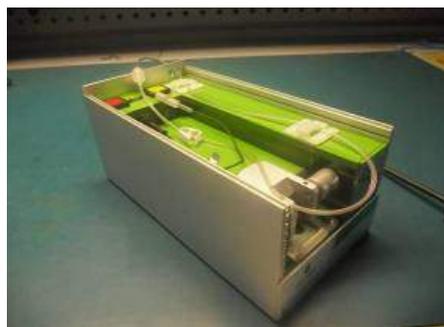


Gambar 1. Tampak atas dari Biochip-C yang menunjukkan komponen sensor penyusunnya, DO sensor (oksigen terlarut), MeOx Sensor (pH), Pt1000 (suhu) dan IDES (impedansi) (Staudacher, 2011)

c. Perangkat IMOLA-IVD

Perangkat detektor yang digunakan adalah IMOLA-IVD (Intelligent Mobile Lab in Vitro Diagnostic). Pada proses pengukuran IMOLA-IVD dapat melakukan pengukuran pada sel hidup dengan kemampuan pembacaan multi parameter secara langsung (real time measurement). Perangkat IMOLA-IVD merupakan suatu sistem dengan komponen-komponen yang terintegrasi, IMOLA-IVD juga berperan sebagai pusat pengolah sinyal yang kemudian dapat ditampilkan melalui PC dan database (Wiest, 2006).

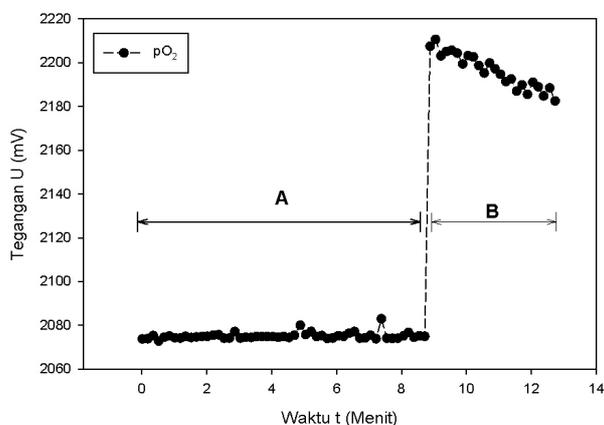
Proses karakterisasi komponen Biochip-C menggunakan perangkat IMOLA-IVD dan Larutan PBS seperti dijelaskan sebelumnya, dimana kondisi pengukuran yang digunakan adalah (i) kondisi IMOLA-IVD dengan pemasangan komponen Biochip-C dan kondisi (ii) komponen Biochip-C dikarakterisasi mempergunakan Larutan PBS. Dari hasil karakterisasi ini diperoleh suatu kondisi sinyal yang memperlihatkan bahwa perangkat IMOLA IVD telah siap untuk pengukuran.



Gambar 2 Tampak Perangkat IMOLA-IVD

III. HASIL DAN DISKUSI

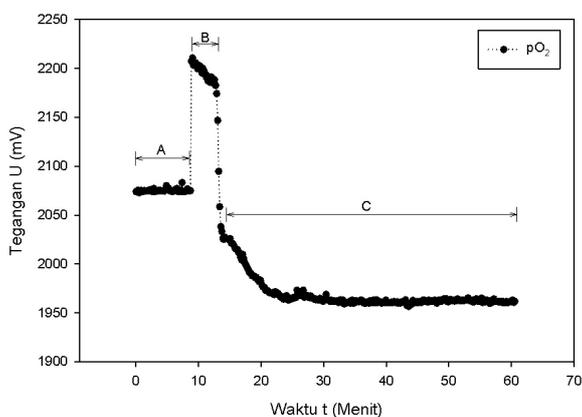
Karakterisasi perangkat IMOLA dilakukan dalam beberapa tahap pekerjaan. Pada tahap pertama dilakukan pengukuran respon IMOLA-IVD. Kegiatan ini dilaksanakan dengan mengkarakterisasi Biochip-C yang diawali dengan pengukuran respon IMOLA-IVD dengan penggunaan komponen Biochip-C, ditunjukkan pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3 Hasil Pengukuran Tegangan IMOLA-IVD (A) tanpa Biochip-C (open circuit) dan (B) dengan Biochip-C

Tegangan yang dihasilkan dalam kondisi A merupakan hasil deteksi IMOLA-IVD pada kondisi tanpa Biochip-C yang merupakan tegangan default dari IMOLA-IVD dengan rata-rata tegangan yang dihasilkan sebesar 2075,1 mV. Respon perubahan tegangan terjadi secara langsung pada kondisi B ketika Biochip_C dipasang didalam IMOLA-IVD. Perubahan ini menunjukkan IMOLA-IVD mampu mendeteksi penggunaan komponen Biochip-C dengan tegangan yang dihasilkan sebesar 2198.2 mV.

Pada tahap berikutnya dilakukan pengukuran untuk melihat respon Biochip-C. Hasil karakterisasi dari Biochip-C menggunakan larutan PBS pH 7,3 dan 2,3 Molar ditunjukkan pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4 Kurva pengukuran oksigen terlarut (pO_2) pada tiga kondisi

Pada kondisi A, komponen Biochip-C tidak menggunakan Larutan PBS yang menunjukkan tegangan default tanpa Larutan. Perubahan terjadi pada awal penggunaan larutan PBS kedalam Biochip-C (Kondisi B). Pada bagian penambahan larutan PBS, nilai potensial menurun secara perlahan dan kemudian menuju titik stabil. Penurunan potensial secara perlahan akibat elektroda biochip mengalami proses elektrolisis dari ion yang terkandung di dalam larutan PBS. Proses elektrolisis kemudian akan menuju titik stabil dimana elektroda biochip telah beradaptasi. Perubahan tegangan yang terjadi menghasilkan rata-rata perubahan tegangan sebesar 1962,41 mV. Secara keseluruhan proses karakterisasi Biochip-C dapat digambarkan dalam Gambar 5 berikut dimana (A) Kondisi Default IMOLA-IVD, (B) Kondisi IMOLA-IVD dengan Biochip-C dan (C) Kondisi IMOLA-IVD dengan Biochip-C yang menggunakan larutan PBS.

Data pengukuran karakterisasi pada Tabel 1 memperlihatkan proses perubahan sinyal yang dideteksi oleh komponen Biochip-C dalam durasi waktu pengukuran untuk tiap kondisi.

Tabel 1. Data pengukuran Karakterisasi Biochip-C

No	Waktu t (Menit)	Potensial U (mV)		Zona	Potensial U (± 100 mV)		ϵ (%)
		Min	Max		Pengukuran	Referensi	
1	0 - 9	2072.89	2083.01	A	2075.1	2045	1.44
2	10 - 12	2185.50	2210.54	B	2198.2	2045	6.96
3	13 - 60	1956.67	1973.14	C	1962.41	1845	5.96

Dari hasil pengukuran terlihat bahwa nilai pengukuran dari karakterisasi Biochip-C menggunakan larutan PBS masih berada didalam jangkauan perangkat IMOLA-IVD yang dikeluarkan oleh perusahaan cellasys. Setelah proses karakterisasi alat siap untuk digunakan pada pengukuran lainnya seperti kualitas air, aplikasi kualitas makanan, deteksi morfologi sel kanker yang berdasarkan pengukuran 4 parameter yaitu pO₂, pH, Z dan suhu T.

IV. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dilakukan Karakterisasi Biochip-C dengan pengukuran perubahan tegangan terhadap perubahan kondisi Biochip-C. Perangkat IMOLA-IVD sebagai pusat pengolahan sinyal menunjukan respon perubahan tegangan dalam penggunaan Biochip-C selama proses pengukuran. Karakterisasi Biochip dengan menggunakan Larutan PBS pH 7.3 dan 2,3 Molar menunjukkan hasil pengukuran berupa kestabilan dari tegangan yang dihasilkan dengan rata-rata tegangan sebesar 1962,41 mV diakibatkan proses adaptasi dari elektroda Biochip-C terhadap ion-ion didalam larutan PBS.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustiningsih, Dyah., 2012, Analisis Kualitas Air dan Beban Pencemaran berdasarkan penggunaan lahan di sungai belukar kabupaten Kendal. *Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*.
- Azwir, 2006, Analisa Pencemaran Air Sungai Tapung Kiri oleh Limbah Industri Kelapa Sawit PT. Peputra Masterin pO₂ di Kabupaten Kampar, *Thesis S2 Program Magister Ilmu Lingkungan*, Program Pasca Sarjana, Universitas Diponegoro, Semarang.
- Biochip C Data Sheets, 2013, cellasys GmbH: Part No.: 085001. <http://www.cellasys.com/>
- Salmin, Oksigen terlarut (DO) dan kebutuhan oksigen biologi (BOD) sebagai salah satu indikator untuk menentukan kualitas perairan, 2005, *Oseana*. 30(3), 21-26.
- Staudacher, P., Schmidhuber. M., Wolf. B., Wiest. J., 2010, Mobile Biosensor For Water Quality Monitoring. *In IEEE Africon*.
- Staudacher, P., 2011, Detection of oil in biotope water with whole-cell biosensor system. *Bachelor Thesis*, Technische Universitaet Muenchen, Germany
- Wiest, J., Stadthagen, T., Schmidhuber. M., Brischwein, M., Ressler, J., Raeder, U., Melzer, A., Wolf. B., 2006, Intelligent Mobile Lab for Metabolic in Environmental Monitoring, *Analytical Letter* 39, 1759-1771.

PENGEMBANGAN ALAT UJI OTOMATIS KARAKTERISTIK DIODA DAN PTC BERBASIS MIKROKONTROLER ATmega8A

Yanuar Hamzah, Rahmondia N. Setiadi, Lazuardi Umar

Jurusan Fisika FMIPA Universitas Riau
Kampus Bina Widya, Jl. Prof. Dr. Muchtar Lutfi
Simpang Baru Pekanbaru 28293
email: yanuar.hamzah@gmail.com

ABSTRAK

Alat uji otomatis yang dapat dipergunakan untuk mengkarakterisasi berbagai jenis dioda dan sensor suhu PTC telah dikembangkan. Rangkaian menggunakan sumber tegangan tetap dengan kemampuan arus yang besar menggunakan MOSFET. Penambahan MOSFET sebagai *buffer* dapat memberikan arus yang lebih besar sebagaimana yang dibutuhkan untuk pengukuran PTC hingga 0.5A. Tegangan referensi dikontrol oleh komputer melalui DAC dan mikrokontroler. Tegangan dari sensor arus dan tegangan DUT dikonversi oleh ADC 12-bit dengan mikrokontroler ATmega8A. Proses pengukuran sepenuhnya dikendalikan oleh komputer dengan menggunakan timer. Respon diode digambarkan melalui kurva $I(U)$ dioda. Pengujian dioda dilakukan dengan step tegangan 10mV, 50mV, 100mV dan 500mV dengan selang waktu pengukuran 0,1s. Sementara sensor PTC tipe RS diuji dengan memberikan tegangan eksitasi dengan lama waktu 0.1s, 1s dan 10s. Penyimpanan data dilakukan secara otomatis di komputer. Hasil pengujian kedua komponen ini memperlihatkan kesesuaian dengan rumusan persamaan dioda dan PTC secara teoritis.

Kata kunci: Alat uji otomatis, karakterisasi, dioda, sensor PTC, tegangan eksitasi

ABSTRACT

Automated testing tool used for characterizing various types of diodes and PTC temperature sensor has been developed. The circuit uses a fixed voltage source with a large current capability using MOSFETs. MOSFET as a buffer can deliver larger currents required for the measurement of PTC up to 0.5A, while the reference voltage is controlled by a computer through the DAC and microcontroller. The voltage of the current sensor and the voltage of Device Under Test (DUT) are then converted by the ADC 12-bit microcontroller ATmega8A and the process is fully controlled by a computer using a timer. Diode response is figured through curves $I(U)$ diode, and the characterizations was carried out using step voltage of 10mV, 50mV, 100mV and 500mv respectively, with 0.1s interval measurement. While the RS-type PTC sensor is tested by applying a voltage excitation up to 25Volts with interval time 0.1s, 1s and 10s. Data storage is done automatically on the computer. The experiments show the $I(U)$ curves of diodes and temperature sensor similar to the formulation of the equation diodes and PTC theoretically.

Keywords: Automated testing tool, characterization, diode, PTC sensor, excitation voltage

I. PENDAHULUAN

Diode merupakan sebuah piranti yang dapat mengalirkan arus dalam satu arah dan memiliki dua buah terminal yaitu Anoda merupakan terminal positif dan Katoda merupakan terminal negatif. Pada aplikasinya, umumnya dioda sebagai piranti semikonduktor berfungsi sebagai penyearah dalam rangkaian elektronik. Dioda dalam rangkaian elektronik hanya dapat mengalirkan arus dalam satu arah yaitu dari anoda ke katoda dan tidak sebaliknya. Pada keadaan riil, dioda butuh sedikit tegangan panjar untuk mengalirkan arus, dan ada sedikit arus yang mengalir dalam keadaan panjar mundur. Ini berarti dioda tidak sepenuhnya ideal. Ada penyimpangan penyimpangan yang terdapat pada dioda (Polyakov, 2003; Hanselaer, et al., 1984).

Selain itu untuk pengecekan apakah sebuah diode masih berfungsi dengan baik atau tidak, diperlukan suatu alat yang dapat mengukur karakteristik diode. Untuk mengetahui karakteristik suatu komponen elektronik dapat dilakukan dengan mempergunakan kurva arus dan tegangan ($I-V$) yang akan memberikan informasi tentang operasi dioda dan merupakan alat tools yang sangat membantu dalam menentukan karakteristik operasi suatu komponen khusus melalui kombinasi yang mungkin

dari arus dan tegangan dan secara grafis dapat membantu mengerti lebih baik secara visual apa yang terjadi dengan rangkaian (Sinton, R.A. and Cuevas, A., 1996).

Oleh sebab itu pada penelitian ini telah dikembangkan alat uji otomatis kurva I(V) dioda yang berguna untuk praktikum di laboratorium Elektronika Dasar dimana hasilnya siswa dapat mengetahui dan memahami hubungan antara arus dan tegangan dioda yang diberikan secara otomatis oleh rangkaian elektronik berbasis mikroprosesor dalam upaya mengetahui karakteristik dari dioda serta mengetahui apakah suatu piranti ini telah mengalami kerusakan permanen. Pemahaman ini dapat diperoleh berdasarkan karakteristik dioda melalui kurva I(V) yang dinyatakan oleh persamaan dioda. Umumnya piranti ini memiliki karakteristik non-linear I-V. Dari kurva karakteristik ini dapat dipelajari pengaruh luar (suhu) terhadap karakteristik dioda secara keseluruhan.

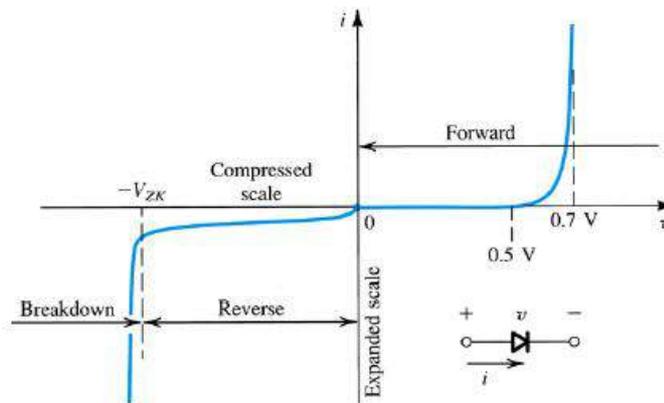
II. METODOLOGI

2.1 Karakteristik Dioda

Pada dioda ideal, jika diberi arus panjar maju maka dioda akan “short“, dan jika diberi arus panjar mundur akan “off“. Pada aplikasinya, dioda tidak bekerja secara ideal, dimana arus akan mengalir secara bertahap setelah tegangan yang diberikan cukup besar. Proses mengalirnya arus pada dioda sesuai dengan (1).

$$i = I_s \left(e^{V_D/nV_T} - 1 \right) \quad (1)$$

dimana I_s merupakan arus saturasi, V_D adalah tegangan dioda, n adalah faktor ideal dioda, V_T adalah tegangan termal dioda. Arus saturasi proporsional dengan luas penampang dioda. Faktor ideal bernilai antara 1 dan 2. Tegangan termal bernilai 25mV pada suhu kamar. Persamaan (1) dapat digambarkan dengan kurva karakteristik dioda yang terdapat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kurva karakteristik I(V) dioda (Tooley, 2012)

Daerah panjar maju diberikan oleh $v > 0$, daerah panjar mundur diberikan oleh $v < 0$, dan daerah breakdown diberikan oleh $v < -V_{ZK}$. Khusus pada daerah panjar maju dan $V_D \gg nV_T$, persamaan dioda menjadi;

$$i = I_s e^{V_D/nV_T} \quad (2)$$

Sementara perubahan suhu dapat mempengaruhi arus yang mengalir pada dioda. Pengaruh suhu terdapat pada tegangan termal yang besarnya sesuai dengan berikut

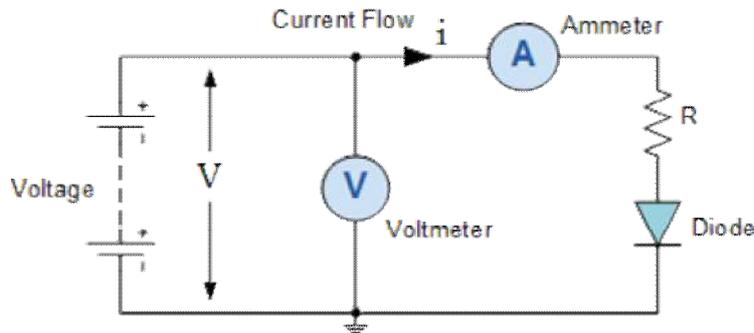
$$V_T = \frac{k_B T}{q} \quad (3)$$

k_B adalah konstanta Boltzmann, T adalah temperatur, dan q adalah muatan elektron. Dari Persamaan (3) dapat dilihat bahwa arus yang melalui dioda akan berkurang dengan meningkatnya temperatur.

2.2 Perancangan Alat

Untuk mengetahui karakteristik dioda tersebut diperlukan alat yang dapat mengukur arus dioda untuk setiap tegangan yang diberikan. Untuk keperluan itu telah dirancang alat yang dapat mengukur arus dan tegangan dioda dan menyimpan data hasil pengukuran tersebut di komputer.

Fungsi utama dari dioda semikonduktor adalah menyearahkan AC ke DC. Misalkan rangkaian karakterisasi sederhana seperti Gambar 2 (Zhang, 2006):



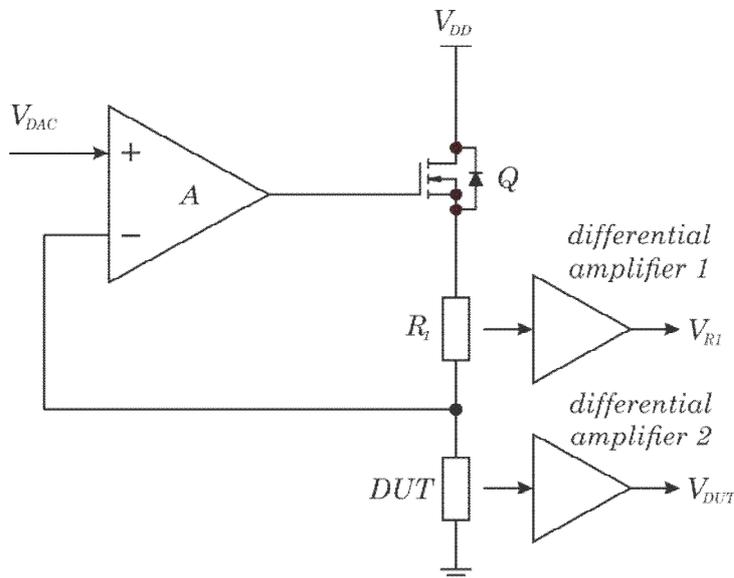
Gambar 2. Rangkaian sederhana untuk karakterisasi dioda

Dioda pada kondisi bias maju (*forward bias*) akan sesuai dengan kurva $I(V)$ pada kuadran atas sebelah kanan pada Gambar 2 dimana jika tegangan dinaikkan secara terus menerus melewati tegangan barrier diodes P-N junction dengan silicon kira-kira 0.7 volts, lonjakan akan terjadi dan arus maju meningkat drastis untuk perubahan tegangan yang kecil dan menghasilkan kurva non-linear. Kebalikan pada kondisi bias mundur (*reversed bias*), dioda akan menahan arus kecuali untuk arus bocor yang sangat kecil.

2.3 Pembuatan dan Desain Perangkat Keras

2.3.1 Rangkaian Sumber Tegangan

Metode pengukuran yang digunakan adalah dengan memberikan tegangan ke *Device Under Test* (DUT) yang akan dites dan kemudian arus yang melalui DUT tersebut diukur. Tegangan yang diberikan dibuffer oleh sebuah op amp dan MOSFET dengan konfigurasi *voltage-follower*, sehingga tegangan yang akan diberikan ke objek memiliki impedansi keluaran yang rendah. Gambar 3 menunjukkan rangkaian *driver* dan *sense* dalam pengukuran $I(V)$.



Gambar 3. Rangkaian pengukuran tegangan dan arus pada DUT

Bagian *driver* terdiri dari Op Amp dan MOSFET, sedangkan bagian *sense* terdiri dari R_1 dan *differential amplifier*. Pada pengukuran ini, tegangan yang diberikan ke DUT harus bisa dikontrol melalui sebuah DAC. Rangkaian driver akan menjamin bahwa tegangan yang keluar dari DAC akan sama dengan tegangan yang diberikan ke DUT. Dari Gambar 3 dilihat bahwa tegangan yang terdapat pada DUT akan sama dengan tegangan pada masukan non-inverting Op Amp, ini karena feedback ke inverting terhubung langsung ke DUT. Dengan demikian dapat dipastikan bahwa tegangan yang kita berikan melalui DAC akan sama dengan tegangan pada DUT. Selain itu sebagai pembanding, tegangan pada DUT juga diukur.

Op Amp dengan *low input bias current* digunakan sebagai buffer. Ini untuk menjamin agar arus yang mengalir dari *Source* MOSFET menuju DUT tidak terpecah ke masukan inverting Op Amp, sehingga arus pada R_1 sama dengan arus pada DUT. Sementara penambahan MOSFET sebagai *buffer* dapat memberikan arus yang lebih besar sebagaimana yang dibutuhkan untuk pengukuran PTC hingga 0.5A. Sedangkan jika tanpa MOSFET, Op Amp hanya mampu memberikan arus sekitar 20mA sampai dengan 40mA, bergantung pada jenis Op Amp yang digunakan.

2.3.2 Rangkaian Konversi Arus

Bagian *Sense* terdiri dari R_1 sebagai sensor arus dan *differential amplifier*. Nilai R_1 cukup kecil agar arus yang diteruskan cukup besar dan tidak terjadi *voltage-drop*, dimana nilai R_1 berkisar antara 0.01 – 1 Ω . Disipasi daya yang terjadi pada R_1 harus diperhitungkan agar tidak lebih besar dari kemampuan disipasi R_1 tersebut. Jika lebih besar, maka R_1 dapat mengalami panas yang berlebihan atau bahkan terbakar. Perhitungan daya disipasi yang terjadi pada R_1 dapat dihitung menurut persamaan berikut;

$$P = I_{max}^2 \cdot R_{sense} \quad (4)$$

dimana P adalah daya disipasi, I_{max} adalah arus maksimum pengukuran dan R_{sense} adalah nilai hambatan R_1 . Arus yang melalui rangkaian dapat diketahui dari nilai tegangan pada R_1 dengan menggunakan persamaan;

$$I = \frac{V_R}{R_{sense}} \quad (5)$$

dimana I adalah arus, V_R adalah tegangan pada R_1 , dan R_{sense} adalah nilai hambatan R_1 .

Differential amplifier mengubah tegangan pada R_1 menjadi *single-ended* agar mudah diumpangkan ke ADC. Penguatan yang terjadi pada *differential amplifier* dihitung berdasarkan range tegangan akhir $V_{om,diff}$ yang ingin diumpangkan ke ADC. Penguatan tersebut dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut;

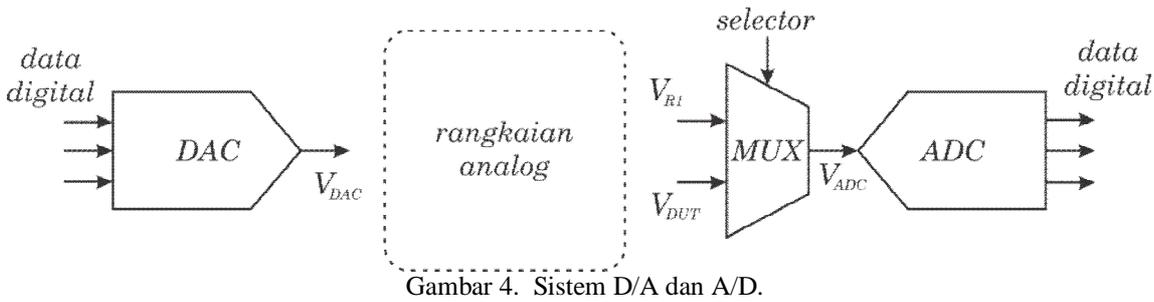
$$A_{diff} = \frac{V_{om,diff}}{V_{Rm}} \quad (6)$$

dimana A_{diff} adalah penguatan pada *differential amplifier*, $V_{om,diff}$ adalah jangkauan tegangan keluaran *differential amplifier*, dan V_{Rm} adalah tegangan pada R_1 saat arus maksimum.

2.3.3 Sistem D/A dan A/D

Sistem eksitasi memberikan tegangan ke DUT untuk mengamati respon yang keluar. Tegangan yang diberikan ke DUT dikontrol menggunakan sebuah DAC serial 12-bit dengan tipe DAC7611. Rangkaian DAC ini dapat memberikan tegangan maksimum 4,095mV dengan resolusi 1 LSB 1mV. Pengoperasian DAC yang sederhana hanya dengan menggunakan 3-wire memudahkan dalam pemakaian DAC ini. DAC dioperasikan mikrokontroler melalui koneksi 3-wire tersebut dan keluaran DAC langsung dihubungkan ke sebuah *driver* pada rangkaian analog agar tegangan tidak drop. Tegangan pada DUT dan R_1 merupakan dua tegangan yang akan diakuisisi. Untuk mengakomodasi kedua masukan tersebut, digunakan sebuah multiplexer (MUX) dengan dua masukan. Pemilihan channel pada MUX dikontrol oleh mikrokontroler.

Sebuah ADC SAR 12-bit digunakan sebagai konverter tegangan analog ke digital. Tipe ADC yang digunakan adalah ADS7822, sebuah ADC dengan kinerja yang cukup baik dan mudah diaplikasikan. ADC ini juga dioperasikan dengan 3-wire oleh mikrokontroler.

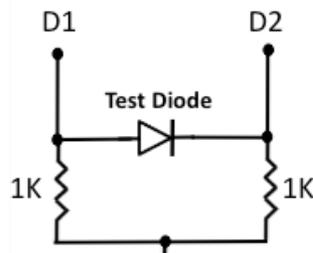


Gambar 4. Sistem D/A dan A/D.

Gambar 4 menunjukkan bagian digital dari sistem. Bagian digital ini dikontrol oleh sebuah mikrokontroler sehingga dapat dioperasikan melalui PC secara otomatis. Tampak bahwa tegangan masukan ke rangkaian analog berasal dari DAC dan tegangan keluaran dari rangkaian analog terdiri dari tegangan DUT dan R_1 . Jika pada penggunaannya tegangan DAC tidak diperkuat atau diperlemah, maka tegangan DAC harus sama dengan tegangan DUT dan tegangan DUT tidak perlu diukur. Tetapi jika tegangan DAC diperkuat atau diperlemah, maka tegangan DAC tidak lagi sama dengan DUT sehingga diperlukan pengukuran tegangan DUT.

2.4 Pengujian Dioda

Logika untuk pengujian dioda adalah bergerak satu arah. Suatu diode adalah PN junction yang mengalirkan arus konduksi hanya dalam satu arah. Oleh sebab itu dioda yang bagus hanya akan mengalirkan arus hanya pada satu arah. Jika mengalir pada kedua arah maka berarti dioda terhubung singkat (short) dan jika keduanya tidak pada kedua arah maka dioda terbuka (open). Implementasi rangkaian diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Konfigurasi pengujian dioda

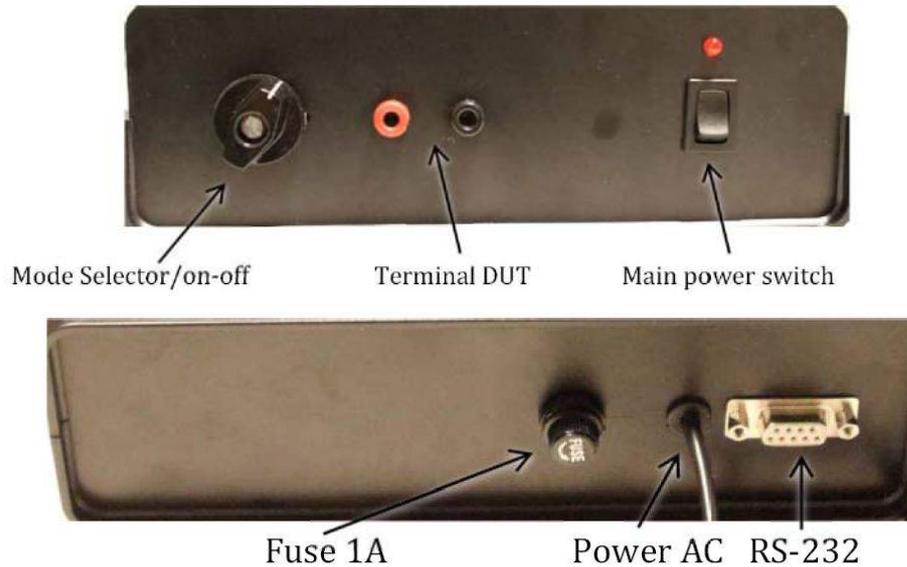
Untuk pengujian lapangan maka input pada D1 dan D2 akan terhubung pada sistem otomatisasi karakterisasi dioda yang mempergunakan mikrokontroler dan analisa akan memberikan hasil apakah dioda masih baik atau telah mengalami kerusakan permanen.

III. HASIL DAN DISKUSI

Tabel 1. Spesifikasi alat uji diode dan tahanan otomatis

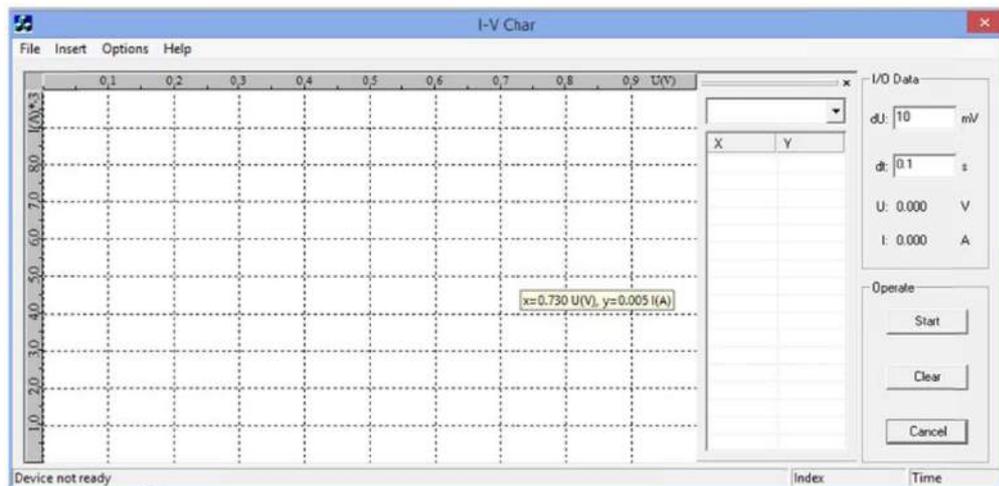
Tegangan keluaran ke DUT	: 0 – 4.095V untuk Dioda 0 – 25V untuk Resistor
Arus masukan dari DUT	: 0 – 0.6A untuk Dioda 0 – 0.1A untuk Resistor
Batas daya maksimum	: 0.5W untuk Resistor
Interval kenaikan tegangan	: Min. 1mV, Maks. 1V
Resolusi arus	: 1mA
Interval waktu	: Min. 0.1s, Maks. 3600s
Tegangan Power Supply	: 220V
Daya	: Maks. 24W
Dimensi	: 180 x 205 x 70 mm
Berat	: Appr. 2.0 kg

Alat uji otomatis yang telah dikembangkan dapat dipergunakan untuk mengkarakterisasi dioda serta tahanan dalam satu paket. Dioda yang dapat diuji bersifat umum yang biasa dipergunakan untuk praktikum elektronika dasar seperti dari tipe 1N40xx, 1N54xx, OA dan lainnya. Tahanan variabel yang dapat diuji mempergunakan alat ini adalah tipe sensor suhu positive temperature coefficient (PTC) tipe RS dari Fa EPCOS. Adapun spesifikasi alat yang telah dibuat dan gambarnya diberikan berikut ini.



Gambar 6. Susunan tombol pada panel depan dan belakang alat uji

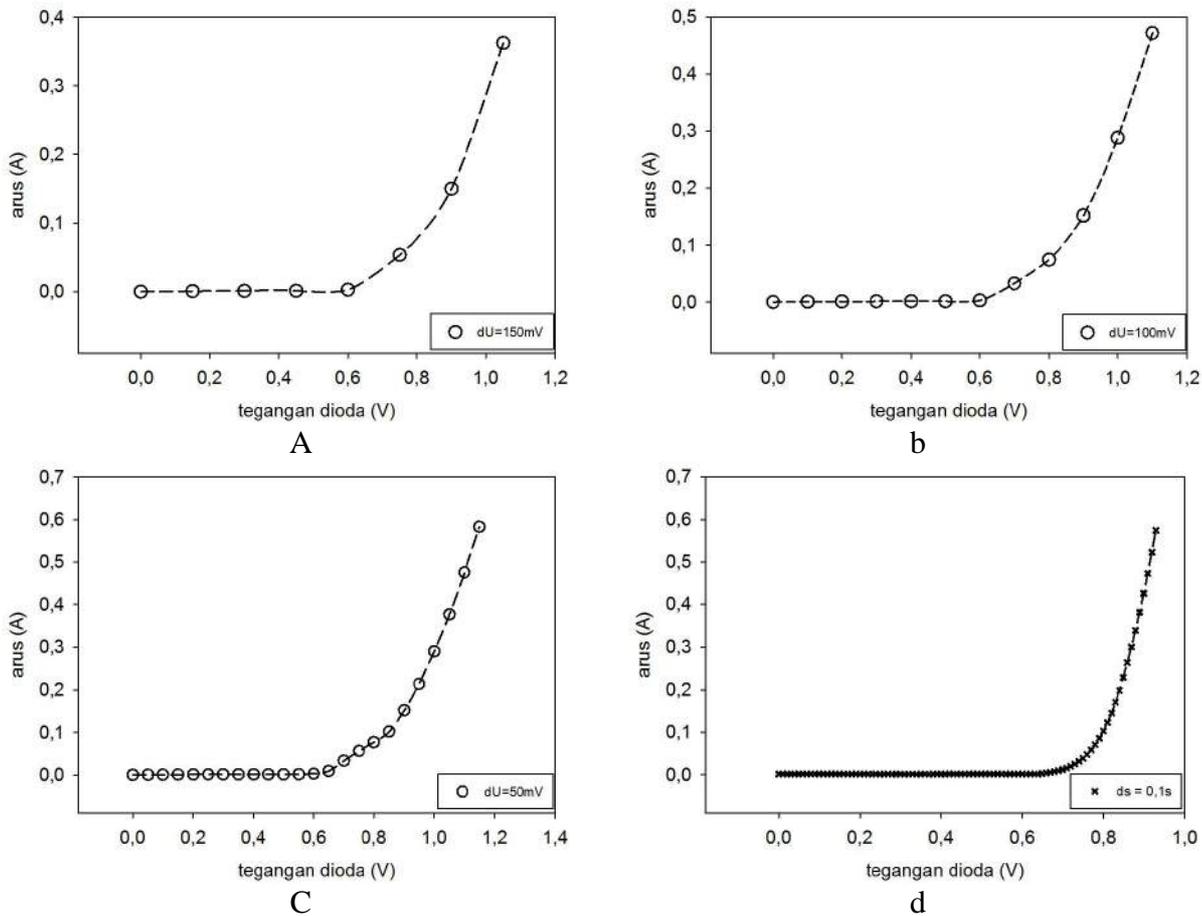
Pada panel depan instrumen (Gambar 6) terdapat saklar multi untuk Mode Selector dengan 3 posisi yaitu paling kiri posisi "OFF", tengah untuk karakterisasi "DIODA" dan paling kanan adalah Mode "RESISTOR". Pengambilan data dilakukan dengan menghubungkan perangkat uji ke komputer mempergunakan konektor RS232 ke PC mempergunakan USB to RS232 converter. Pengendalian pengukuran dilakukan dengan software IVChar melalui windows I-V Char pada Gambar 7.



Gambar 7. Software pengendali sistem karakterisasi dioda dan resistor

Setelah program IV Characterizer dijalankan, jika instrument terdeteksi maka tampil status device ready on COMXX. Komponen DUT yang akan dites dipasang pada terminal merah anoda dan hitam katoda. Sementara untuk resistor tidak ada polaritas. Input yang diperlukan pada windows berikutnya adalah nilai interval tegangan dU dan nilai interval waktu dt . Klik start untuk memulai karakterisasi maka file akan disimpan otomatis dengan format EXCEL.

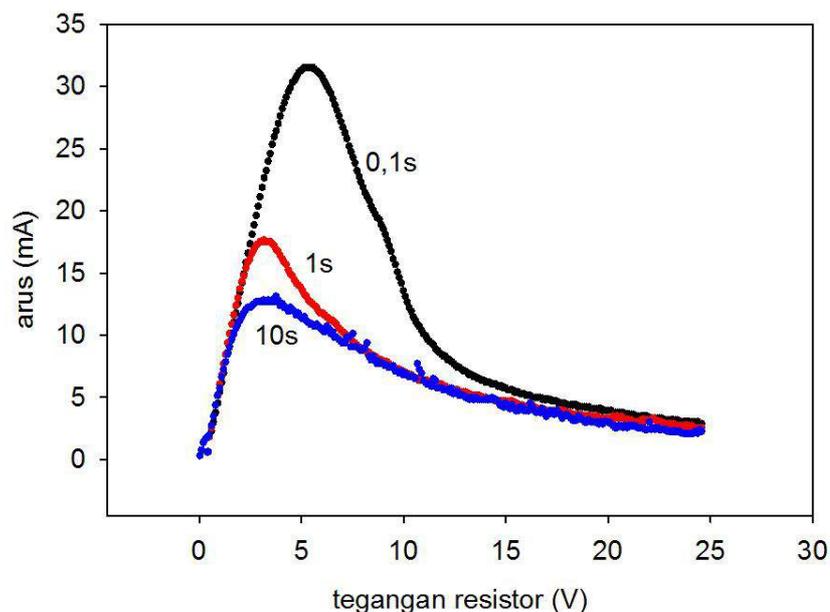
Ujicoba pertama dilakukan dengan mengukur karakteristik I(V) dari dioda 1N4001 dengan memvariasikan tegangan interval yaitu 150mV, 100mV, 50mV. Kemudian, hasil ini dibandingkan dengan kurva yang diset pada $dU=10\text{mV}$ dan $dt=0,1\text{s}$ seperti diperlihatkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Kurva karakteristik dioda 1N40xx pada arah panjar maju

Terlihat bahwa kurva panjar maju yang dihasilkan oleh alat uji memiliki bentuk yang sesuai dengan kurva I(V) dioda pada teori. Kurva mulai menanjak naik pada sekitar 600mV yang merupakan tegangan lutut (knee) dari dioda. Analisa lebih lanjut dapat dilakukan mempergunakan pemodelan kurva I(V) dengan persamaan umum dioda pada persamaan 1.

Sementara untuk pengujian resistor bergantung suhu positif (PTC) yang umum dipergunakan sebagai sensor suhu diperlihatkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Kurva karakteristik resistor suhu PTC dengan variasi waktu injeksi

Pada Gambar 9 terlihat bahwa kurva mengalami pergeseran puncak ke kanan jika waktu pemberian arus pada PTC menjadi kecil. Sementara arus yang dibutuhkan cenderung mengecil pada waktu pengujian yang lama. Hal ini disebabkan karena sensor suhu PTC mengambil arus dan menyesuaikan dengan kondisi stasionernya sehingga arus yang ditarik relatif lebih kecil. Pemanasan internal self heating dari sensor suhu PTC bereaksi secara cepat pada pemberian arus transien 0,1s dan sebelum sempat menyesuaikan diri ke dalam kondisi stasioner, arus yang diberikan telah berubah.

IV. KESIMPULAN

Alat uji karakteristik dioda yang terintegrasi dengan alat uji resistor berbasis mikrokontroler ATmega 8 telah berhasil dibuat. Alat dapat dipergunakan untuk memperoleh kurva I(V) dari dioda pada kuadran I atau panjar maju serta untuk mengamati kurva I(V) dari sensor suhu PTC sepanjang operasinya. Analisa parameter dari dioda dan resistor PTC dapat dilakukan dengan simulasi kurva I(V) menggunakan persamaan umum dioda dan persamaan kesetimbangan sensor suhu PTC.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini dibiayai oleh Hibah Penelitian Laboratorium, Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Riau tahun 2015.

DAFTAR PUSTAKA

- Hanselaer, P. L., Lafière W. H., Van Meirhaeghe R. L. and Cardon F., 1984, Current-voltage characteristic of Ti-pSi metal-oxide-semiconductor diodes, *J. Appl. Phys.* 56, 2309; <http://dx.doi.org/10.1063/1.334265>
- Polyakov, A. Y., 2003, Electrical characteristics of Au and Ag Schottky contacts on n-ZnO, *Appl. Phys. Lett.* 83, 1575.
- Sinton, R.A. dan Cuevas, A., 1996, Contactless determination of current-voltage characteristics and minority-carrier lifetimes in semiconductors from quasi-steady-state photoconductance data, *Appl. Phys. Letter.* 69, 2510.
- Tooley, Mike, 2012, *Electronic Circuits: Fundamentals and Applications*, 3rd Ed. Routledge. p. 81. ISBN 1-136-40731-6.
- Zhang, Z. Y. , 2006, Current-voltage characteristics and parameter retrieval of semiconducting nanowires, *Appl. Phys. Lett.* 88, 073102.

RANCANG BANGUN *MAGNETIC STIRRER* BERBASIS MIKROKONTROLER AT89S52 DENGAN LAMA PENGADUKAN DITENTUKAN MELALUI *KEYPAD*

Wildian, Meqorry Yusfi, Hariza Faisal

Jurusan Fisika Universitas Andalas, Padang

e-mail: wildian_unand@yahoo.com

ABSTRAK

Telah dilakukan perancangan *magnetic stirrer* berbasis mikrokontroler AT89S52 dengan lama putaran ditentukan melalui *keypad* 4x4. Sebuah magnet batang 30 mm x 8 mm digunakan sebagai pengaduk di dalam bejana (gelas ukur 250 ml) berisi cairan yang hendak diaduk. Pengaduk terhubung secara magnetik dengan dua buah magnet berbentuk piringan (masing-masing berdiameter 1,5 cm dan berjarak 3,0 cm satu sama lain) yang ditempatkan di bawah bejana. Kedua magnet dilekatkan pada sepotong PCB yang dilekatkan pada sebuah motor DC sehingga ketika motor berputar, pengaduk juga ikut berputar. *Magnetic stirrer* ini dapat digunakan untuk mengaduk cairan dengan kekentalan maksimum 4,1 poise dan volume 250 ml pada kecepatan putar 2580 rpm. Empat variasi kecepatan putar (1800 rpm, 1980 rpm, 2280 rpm, dan 2580 rpm) dapat dipilih dengan cara memutar potensio putar 5 k Ω tipe langkah (*step*).

Kata kunci: *magnetic stirrer*, mikrokontroler AT89S52, motor DC

ABSTRACT

A magnetic stirrer based on an AT89S52 microcontroller with a desired rotating duration value input through a 4x4 keypad has been designed and implemented. A bar magnet of 30 mm x 8 mm is used as a stirrer placed in a canister (i.e beaker glass of 250 ml) filled liquid being stirred. The stirrer is connected magnetically to two disc magnets (each magnet has diameter of 1.5 cm and separated 3.0 cm one other) placed under the canister. The two magnets were mounted on a PCB that unified to a DC motor, so that the stirrer rotated as the motor did. This magnetic stirrer is able to stir a liquid that has a viscous of 4.1 poise (maximum) and volume of 250 ml at the angular velocity of 2580 rpm. There are four various angular velocities (1800 rpm, 1980 rpm, 2280 rpm, dan 2580 rpm) those can be chosen by rotating the 5-k Ω rotary potentiometer of step type.

Key words: magnetic stirrer, AT89S52 microcontroller, DC motor

I. PENDAHULUAN

Mekanisme yang lazim digunakan untuk mempercepat proses pelarutan atau pencampuran zat/bahan kimia adalah pemanasan dan pengadukan. Selain lebih cepat larut atau tercampur, larutan/campuran yang dihasilkan juga lebih homogen.

Pengadukan dapat dilakukan dengan atau tanpa batang pengaduk. Pengadukan tanpa batang pengaduk dilakukan dengan cara mengguncang-guncang (*shake*) wadah cairan ke kiri dan ke kanan berulang kali, seperti pada proses pelarutan tembaga PCB (*printed circuit board*) dalam larutan ferriklorida (FeCl₃) yang lazim dilakukan di laboratorium elektronika dan instrumentasi. Pengadukan dengan menggunakan batang pengaduk dapat dilakukan dengan cara menggerakkan secara melingkar batang pengaduk yang diposisikan secara vertikal di dalam zat cair, atau dengan cara memutar batang pengaduk yang dibenamkan secara horizontal di dalam cairan tersebut. Pengadukan dapat dilakukan secara manual (digerakkan dengan tangan) atau secara otomatis (dengan menggunakan peralatan elektronik).

Salah satu mesin pengaduk elektronik yang sering digunakan di laboratorium penelitian, terutama penelitian yang menggunakan cairan/zat kimia, adalah *magnetic stirrer* (Wikipedia, 2012). Laboratorium teknik kimia (bidang biokimia) menggunakan *magnetic stirrer* yang dimanfaatkan antara lain untuk menghasilkan pencampuran homogen pada kultur sel (Nazdah, 2006). *Magnetic stirrer* juga digunakan di laboratorium fisika material, antara lain dalam proses pelapisan kaca ITO (*indium tin oxide*) dengan senyawa TiO₂ untuk menghasilkan material semikonduktor yang akan digunakan sebagai piranti sel surya (Andari, 2011).

Magnetic stirrer yang tersedia di pasaran ada yang sudah dilengkapi dengan lempeng pemanas (*hot plate*) sehingga proses untuk mempercepat pelarutan/ pencampuran dapat dilakukan dengan dua mekanisme sekaligus, yaitu pengadukan dan pemanasan. Pada alat tersebut terdapat tombol putar (untuk memilih kecepatan putar pengaduk, biasanya antara 60 rpm - 1500 rpm) dan tombol temperatur (untuk memilih temperatur yang diperlukan saat pengadukan).

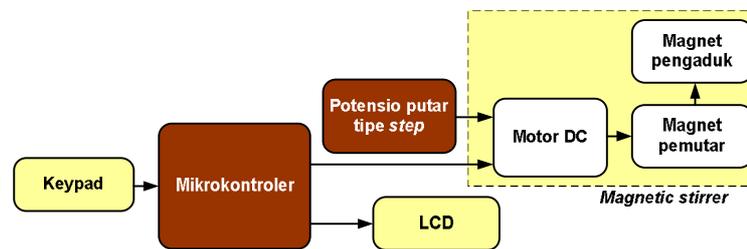
Setelah kecepatan putar dipilih dan alat dinyalakan (ON), pengaduk berputar secara terus menerus, dan baru berhenti jika arus listrik diputus oleh pengguna dengan menekan tombol OFF. Oleh sebab itu, pengguna harus menunggu proses tersebut selama waktu yang diperlukan dengan menggunakan *stopwatch*. Waktu pengadukan yang diperlukan biasanya berkisar antara 30 menit hingga dua jam. Sebagai contoh, untuk mendapatkan hasil mikrostruktur yang lebih baik pada penelitiannya Yusuf, dkk (2010) membutuhkan waktu pengadukan selama 2 jam. Pada penelitian lain, Pratiwi (2012) membutuhkan waktu pengadukan juga 2 jam untuk mengetahui karakteristik *greasae* minyak jelanta.

Dalam penelitian ini telah dibuat suatu *magnetic stirrer* berbasis mikrokontroler AT89S52 untuk mengontrol lama pengaduk berputar. Dengan pengontrolan waktu ini maka pengguna tidak perlu lagi harus menunggu proses yang sedang berlangsung sehingga waktunya dapat digunakan untuk keperluan lain yang lebih bermanfaat.

II. METODOLOGI

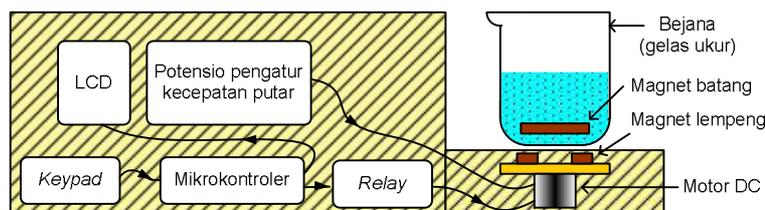
Beberapa alat yang digunakan antara lain: solder, pencabut timah, tang penjepit, gunting, obeng, gergaji, gelas ukur 250 ml, multimeter, dan *personal computer* (PC). Adapun bahan dan komponen penelitian yang digunakan meliputi: PCB polos, timah, jumper dan *crocodile clip*, *breadboard*, papan triplek, magnet batang dan magnet lempeng, resistor tetap, resistor variabel (potensiometer tipe *step*), kapasitor, transistor, transformator, IC regulator, LCD, mikrokontroler AT89S52, X-tal, motor DC, dan *keypad* 4x4.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental dengan prosedur sebagai berikut: (1) Melakukan perancangan diagram blok dan skematik rangkaian, (2) merakit dan menguji blok-per-blok rangkaian pada *breadboard*, (3) merancang tataletak komponen pada PCB dengan menggunakan perangkat lunak *Eagle*, (3) merakit dan menyolder komponen pada PCB, (4) merancang program dalam bahasa pemrograman C untuk pengendalian sistem, (5) menanam program pada mikrokontroler AT89S52, dan (6) mengkarakterisasi dan menguji sistem secara keseluruhan. Diagram blok sistem *magnetic stirrer* berbasis mikrokontroler ini dirancang seperti pada Gambar 1.



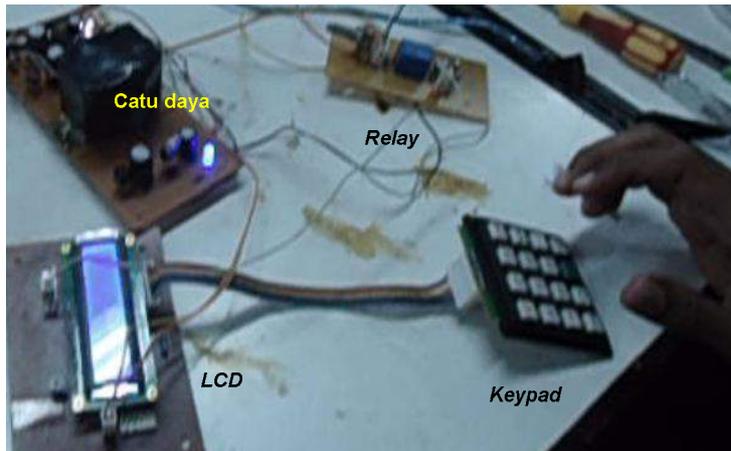
Gambar 1. Diagram blok sistem *magnetic stirrer* berbasis mikrokontroler.

Sebuah magnet batang 30 mm x 8 mm digunakan sebagai pengaduk di dalam bejana (gelas ukur 250 ml) berisi cairan yang hendak diaduk. Pengaduk terhubung secara magnetik dengan dua buah magnet berbentuk lempeng/piringan (masing-masing berdiameter 1,5 cm dan berjarak 3 cm satu sama lain) yang ditempatkan di bawah bejana. Kedua magnet dilekatkan pada sepotong PCB, dan PCB tersebut dilekatkan pada sebuah motor DC sedemikian sehingga ketika motor berputar, pengaduk juga ikut berputar (Gambar 2).



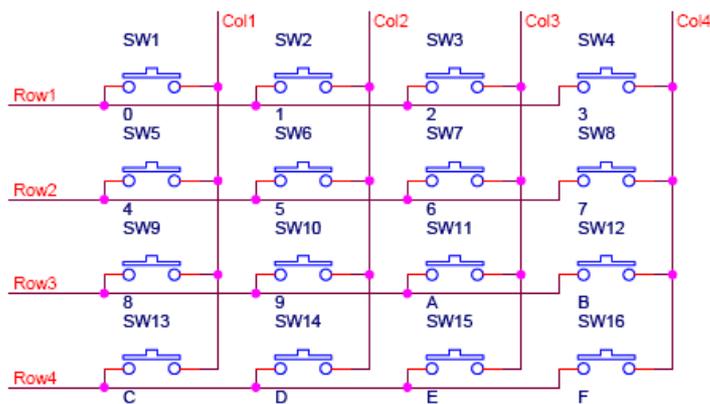
Gambar 2. Tampak samping sistem yang akan dibangun.

Sebuah *keypad* 4x4 digunakan untuk memasukkan nilai lamanya waktu pengadukan (Gambar 3). Cara kerja *keypad* hampir sama seperti *switch* dimana jika salah satu tombol ditekan akan menyebabkan pin-pin tertentu menjadi terhubung.



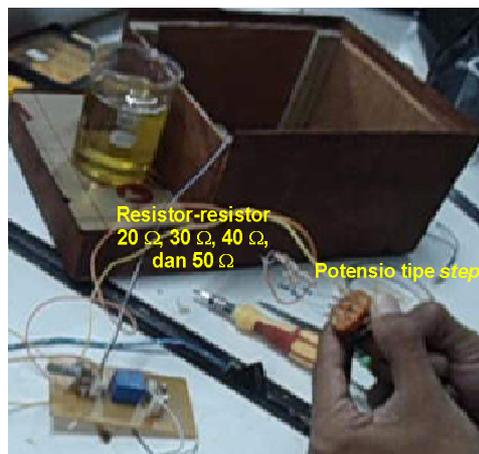
Gambar 3. Koneksi keypad ke LCD, relay, dan catu daya.

Secara sederhana prinsip kerja dari keypad adalah dengan membagi port tersebut menjadi 4 baris dan 4 kolom seperti diperlihatkan pada Gambar 4. Sebagai contoh jika SW1 ditekan maka arus akan mengalir dari kolom 1 dan baris 1 sehingga mikrokontroler dapat mengetahui tombol SW1 aktif sedangkan tombol yang lain dalam keadaan tidak aktif.



Gambar 4. Skema keypad 4x4

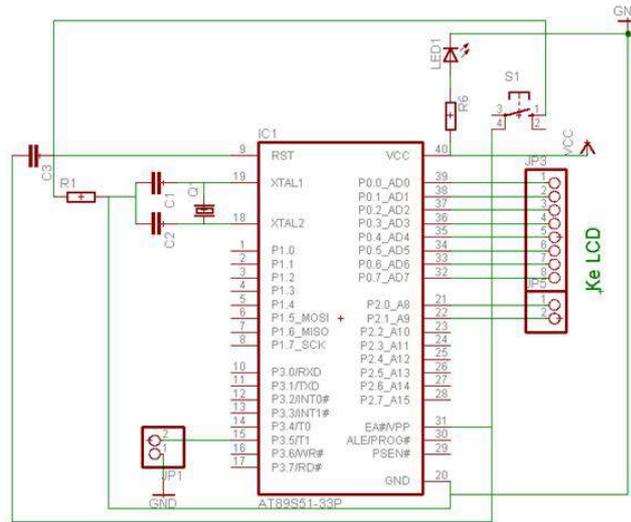
Adapun kecepatan pengadukan dapat dipilih dengan memutar potensio putar 5 k Ω tipe langkah (*step*) ke salah satu dari 4 pin terminalnya yang dihubungkan secara seri dengan resistor-resistor 20 Ω , 30 Ω , 40 Ω , dan 50 Ω untuk menghasilkan variasi kecepatan putar motor DC sebesar 2580 rpm, 2280 rpm, 1980 rpm, dan 1800 rpm, berturut-turut (Gambar 5). Motor DC yang digunakan adalah tipe 12 V. Ini berarti bahwa poros motor DC ini dapat berputar maksimum jika diberi tegangan 12 V dengan arus maksimum 1 A.



Gambar 5. Potensio putar 5 kΩ tipe langkah (*step*)

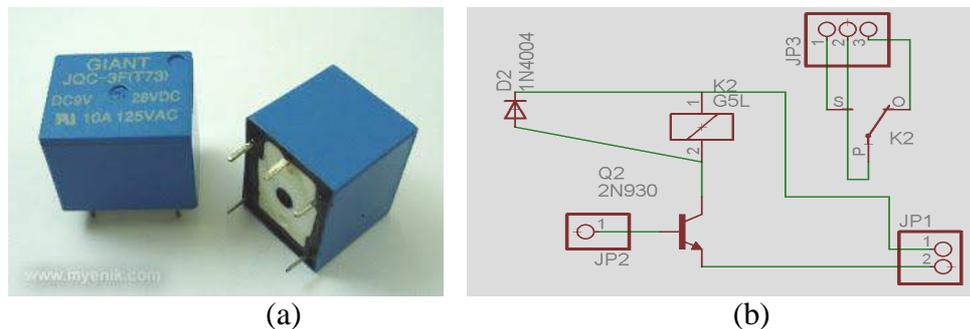
Catu daya yang dibuat pada penelitian ini adalah catu daya 5 V, 6 V, dan 12 V pada satu papan (*board*). Catu daya 5 V digunakan untuk mencatu sistem minimum mikrokontroler AT89S52, catu daya 6 V digunakan untuk menggerakkan *relay*, sedangkan catu daya 12 V digunakan untuk menggerakkan motor DC.

Sinyal masukan dari *keypad* akan diolah oleh mikrokontroler yang berfungsi sebagai pengendali motor DC dan LCD (Agfianto, 2003). Rangkaian sistem minimum mikrokontroler ditunjukkan oleh Gambar 6.



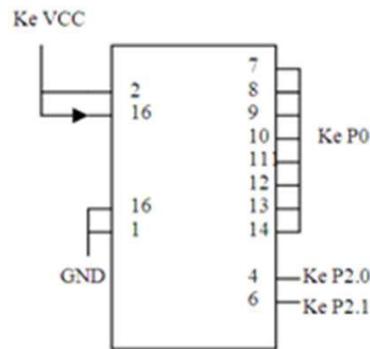
Gambar 6. Skematik rangkaian sistem minimum mikrokontroler.

Sinyal masukan pada sistem minimum ini berasal dari *keypad*, dimana kaki keluar dari *keypad* yang berjumlah 8 kaki langsung dimasukkan ke dalam Port 3 pada mikrokontroler. Sinyal keluarannya dikirim melalui pada Port 2.5 dan port tersebut sebagai penghubung antara rangkaian sistem minimum mikrokontroler dengan rangkaian *relay*. Komponen-komponen yang digunakan untuk rangkaian *relay* dalam penelitian ini adalah *relay* 6 V, diode 1 A, potensiometer 5 kΩ dan transistor BC 109. Semua komponen tersebut dirangkai berdasarkan Gambar 7 yang telah disketsa dengan program *EAGLE 5.11*. Pengujian *relay* dilakukan dengan pemberian logika *high* atau *low* melalui mikrokontroler yang telah diprogram dengan bahasa C, dimana ketika *relay* diberi logika *high* maka *relay* akan aktif dan ketika *relay* diberikan logika *low* maka *relay* akan nonaktif.



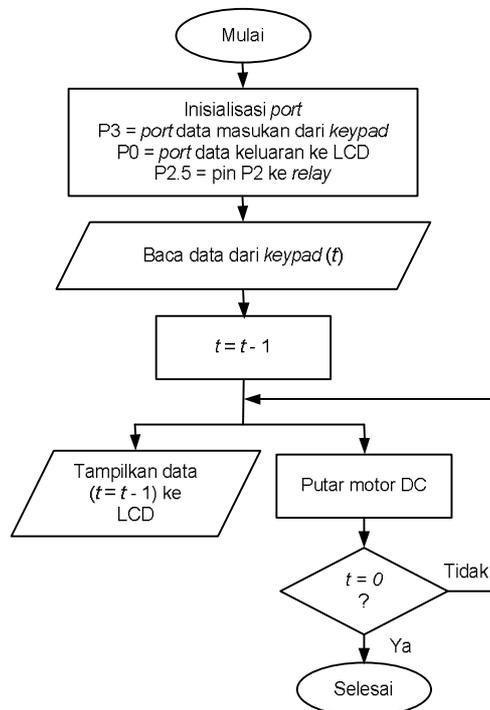
Gambar 7. (a) *Relay*, dan (b) skematik sistem rangkaian *relay*.

LCD 2x16 karakter digunakan untuk menampilkan angka yang menyatakan nilai masukan waktu putar motor DC. Koneksi LCD ke mikrokontroler dan catu daya ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Skematik koneksi LCD ke mikrokontroler dan catu daya.

Sistem *magnetic stirrer* ini dikendalikan berdasarkan program yang ditulis dalam bahasa pemrograman C. Diagram alir (*flowchart*) program adalah seperti pada Gambar 9.

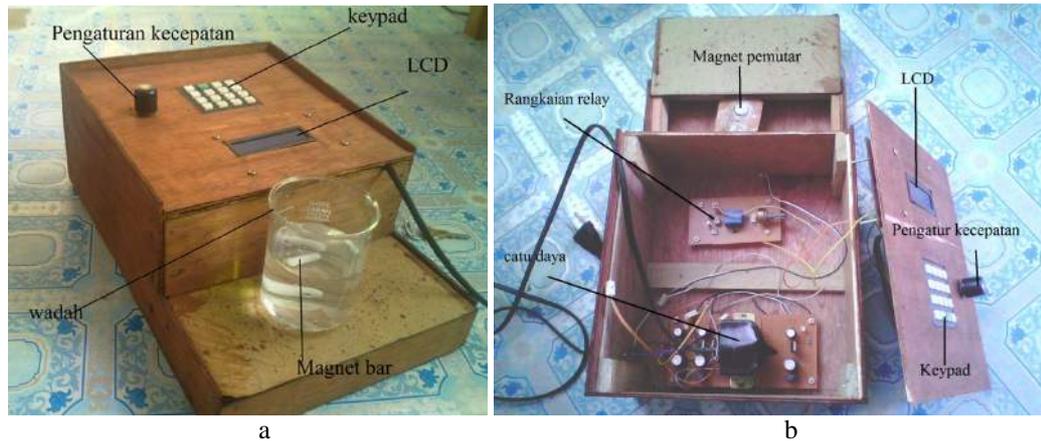


Gambar 9. Diagram alir program pengendalian sistem.

Setelah ditulis, program dikompilasi dengan perangkat-lunak MIDE-51, dan kemudian ditanamkan ke mikrokontroler AT89S52 dengan menggunakan perangkat-lunak ISP.pgm. Tahap akhir prosedur penelitian ini adalah uji rangkaian sistem secara keseluruhan, termasuk menentukan tingkat kekentalan cairan yang dapat diaduk.

III. HASIL DAN DISKUSI

Magnetic stirrer yang dihasilkan dari penelitian ini adalah seperti pada Gambar 10. Spesifikasi Alat sebagai berikut: sebuah kotak berdimensi 33 cm x 21 cm x 11 cm sebagai kotak kemas rangkaian dan tempat meletakkan wadah cairan yang hendak diaduk, sebuah tombol empat langkah untuk memilih kecepatan putar pengaduk, sebuah keypad 4x4 untuk memasukkan nilai waktu lamanya pengadukan, dan sebuah LCD 2x16 karakter untuk menampilkan waktu proses pengadukan yang tersisa.



Gambar 10 Magnetic stirrer yang dihasilkan dalam tampilan (a) tampak-luar, dan (b) tampak-dalam.

Hasil pengujian terhadap kemampuan *magnetic stirrer* dalam mengaduk zat cair dengan kekentalan yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengujian kemampuan aduk *magnetic stirrer* terhadap beberapa zat cair.

No	Zat cair	Volume	Kecepatan putar motor			
			1800 rpm	1980 rpm	2280 rpm	2580 rpm
1	Minyak goreng (2,19 poise)	100 ml	++++	√	√	√
2		150 ml	+++	++++	√	√
3		200 ml	++	+++	++++	√
4		250 ml	+	++	+++	++++
5	Oli (4,1 poise)	100 ml	+	++	+++	++++
6		150 ml	-	-	-	+++
7		200 ml	-	-	-	++
8		250 ml	-	-	-	+

Keterangan tanda pada Tabel 1:

Tanda	Artinya
√	Cairan sudah berputar maksimum sehingga pengadukan tidak dilanjutkan.
-	Cairan tidak dapat diaduk oleh <i>magnetic stirrer</i> .
+	Cairan berputar lambat dan tidak menimbulkan turbulensi .
++	Cairan berputar agak cepat dan menimbulkan turbulensi hanya di bagian bawah.
+++	Cairan berputar lebih cepat dan menimbulkan turbulensi hingga ke bagian tengah dari ketinggian cairan.
++++	Cairan berputar sangat cepat dan menimbulkan turbulensi hingga ke permukaan.

Pengujian variasi kecepatan putar dilakukan untuk melihat kemampuan motor menggerakkan magnet pengaduk hingga menghasilkan putaran dalam cairan. Jika putaran motor telah menghasilkan putaran cairan hingga ke permukaan, maka pengadukan untuk kecepatan putar motor yang lebih tinggi tidak dilakukan lagi.

Pengukuran kuantitatif terhadap aliran arus pusar yang dibangkitkan oleh *magnetic stirrer* dalam suatu bejana silinder menunjukkan bahwa kecepatan tangensial aliran ini bergantung pada frekuensi putar batang pengaduk. Penelitian tersebut juga menjelaskan bahwa aliran tangensial ini mirip seperti pusaran angin tornado di atmosfer (Halasz dkk, 2007).

Pada larutan minyak goreng dengan volume 100 ml dapat diaduk dengan menggunakan kecepatan putar motor 1800 rpm; artinya hanya dengan menggunakan kecepatan putar ini magnet pengaduk (*magnet bar*) berputar maksimum yang menyebabkan larutan teraduk secara merata. Pada larutan minyak goreng dengan volume 250 ml kecepatan putar motor yang digunakan adalah 2580

rpm; artinya pada volume ini kecepatan putar maksimal-lah yang dapat digunakan untuk mengaduk larutan secara merata.

Variasi volume yang dibuat dalam penelitian ini adalah 100 ml, 150 ml, 200 ml dan 250 ml. Jika volume cairan yang hendak diaduk lebih kecil dari 100 ml, kita dapat menggunakan kecepatan putar motor 1800 rpm, namun dengan memperbesar jarak antara magnet pemutar dan magnet pengaduk sehingga hasil adukannya tidak berserakan.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil uji akhir yang telah dilakukan, *magnetic stirrer* berbasis mikrokontroler AT89S52 yang dihasilkan dari penelitian ini dapat digunakan untuk mengaduk cairan dengan kekentalan maksimum 4,1 poise dan volume 250 ml pada kecepatan putar 2580 rpm. Alat ini menyediakan 4 variasi pilihan kecepatan putar (1800 rpm, 1980 rpm, 2280 rpm, dan 2580 rpm) dengan cara memutar potensiometer 5 k Ω tipe langkah (*step*). Lama pengadukan dapat diatur dengan memasukkan nilai waktu yang diinginkan melalui *keypad* 4x4.

DAFTAR PUSTAKA

- Agfianto E.P., 2003, *Belajar Mikrokontroler AT89C51/52/55*, Gava Media, Yogyakarta.
- Andari, R., 2011, Sintesis dan Karakteristik Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) dengan Sensitizer Antosianin dari bunga Rosella (*Hibiscus sabdariffa*), *Tesis*, Program Pasca Sarjana Universitas Andalas, Padang.
- Halász, G., Gyüre, B., Jánosi, I.M., Szabó, K.G., dan Tél, T., 2007, Vortex Flow Generated By A Magnetic Stirrer, *Jurnal, American Association of Physics Teachers*
- Nazdah, W., 2006, Design, Fabricate and Testing of Stationary Magnetic Stirrer Bar for Uniform Mixing of Cell Culture, *Laporan Riset*, Research VOT NO: 71938, Universiti Teknologi Malaysia, Johor, Malaysia
- Pratiwi, 2012, Pengaruh Variasi Berat Minyak Jelantah dan Waktu Pengadukan Menggunakan Mesin Pengaduk, *Skripsi S1 Teknologi Pertanian (Ilmu dan Teknologi Pangan)*, Universitas Jenderal Soedirman, Jawa Tengah.
- Yusuf, Y., Emriadi, Jamarun, N., dan Silvia, 2010, Pengaruh Komposisi, pH, Temperatur dan Waktu Pengadukan Terhadap Perolehan Alumina Dari Al(NO₃)₃ Secara Sol-Gel, *Jurnal, Jurnal Kimia Andalas* Vol. 7 No. 2, Universitas Andalas, Padang.

RANCANG BANGUN ALAT UKUR LAJU PERNAPASAN MANUSIA BERBASIS MIKROKONTROLER ATmega8535

Wendi Era Sonata, Wildian

Jurusan Fisika FMIPA Universitas Andalas

e-mail:sonatafisika@yahoo.co.id

ABSTRAK

Telah dilakukan rancang-bangun sebuah alat ukur laju pernapasan manusia berbasis mikrokontroler ATmega8535 dan sensor temperatur LM35. Konsep dasar sistem ini adalah mencacah jumlah napas per menit berdasarkan temperatur udara yang keluar melalui lubang hidung. Temperatur tersebut diubah menjadi sinyal tegangan analog oleh ADC yang tersedia di dalam ATmega8535. Oleh karena nilai temperatur udara yang keluar dan yang masuk dapat terbedakan, maka jumlah napas dapat dicacah dengan menggunakan program yang ditulis dan ditanam ke dalam mikrokontroler. Sebuah LCD 2x16 karakter digunakan untuk menampilkan nilai laju respirasi dan jenisnya. Hasil karakterisasi sensor memperlihatkan bahwa sensor yang digunakan memiliki sensitivitas sebesar 9,6 mV/OC. Uji akhir memperlihatkan alat memiliki akurasi sebesar 96,5%. Penampilan jenis laju pernapasan diprogram hanya untuk orang dewasa. Kata kunci: laju pernapasan, sensor temperatur, ATmega8535, sensitivitas, akurasi.

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kesehatan merupakan aset penting bagi setiap orang. Orang yang sehat secara fisik (jasmani) dan mental (rohani) akan mampu melakukan pekerjaannya secara optimal. Ditinjau dari sudut pandang pemerintah, kesehatan merupakan salah satu faktor penentu kualitas sumber daya manusia. Oleh sebab itu, kesehatan individu dan masyarakat perlu selalu diperhatikan, dirawat, dan dijaga.

Ada empat parameter fisiologis penting yang biasa digunakan oleh para perawat atau tenaga medis dalam menentukan status kesehatan pasien di rumah sakit. Keempat parameter tersebut adalah temperatur tubuh, laju detak/denyut jantung, laju pernapasan, dan tekanan darah (Royal College of Nursing, 2013). Dari keempat parameter itu, laju pernapasan merupakan parameter terpenting karena laju pernapasan dapat memberikan informasi berharga terkait dengan kondisi jantung, syaraf, dan paru-paru (Braun, 1990, dalam Mathew dkk., 2012). Selain itu, status kesehatan bayi prematur (*neonate*), bayi di bawah 6 bulan (*infant*), dan pasien yang sedang dalam kondisi kritis umumnya dipantau melalui pengukuran laju pernapasannya (Tan dkk., 2010, dalam Das, 2013).

Pernapasan (*respiration*) adalah proses yang menyebabkan oksigen masuk ke paru-paru dan mencapai sel-sel tubuh, serta proses (dalam arah sebaliknya) yang menyebabkan karbon dioksida keluar dari tubuh melalui hidung atau mulut (British Medical Association, 2005). Oksigen diperlukan sebagai reaktan dalam pembentukan energi di dalam sel-sel tubuh, sedangkan karbon dioksida merupakan hasil sisa yang harus dibuang karena bersifat racun bagi tubuh.

Pernapasan umumnya berlangsung secara pasif (tanpa kita sadari) melalui saluran pernapasan yang terdiri atas hidung, *laring*, *faring*, *trakea*, dan paru-paru. Adapun laju pernapasan didefinisikan sebagai jumlah total napas, atau siklus pernapasan, yang terjadi tiap menit (OpenStax, 2013). Laju pernapasan yang abnormal, seperti laju pernapasan yang terlalu tinggi (takipnea), terlalu rendah (bradypnea), atau bahkan terhenti beberapa saat (apnea), merupakan indikator yang sensitif bagi penderita fisiologis yang memerlukan penanganan kesehatan dengan segera.

Metode paling sederhana untuk menentukan laju pernapasan adalah dengan menghitung langsung (secara manual) gerak naik-turun dinding rongga dada, atau dengan mendengar bunyi napas (*breathing sounds*) melalui stetoskop. Metode ini sangat bergantung pada konsentrasi pikiran dan kepekaan indera pelaku pengukuran/ pengamatan. Oleh karena sifat manusia yang mudah lupa, lelah, dan bosan, maka kini banyak dikembangkan metode pengukuran/ pengamatan laju pernapasan secara elektronik.

Rancang-bangun alat ukur laju pernapasan dengan menggunakan metode non-kontak telah dilakukan oleh Gupta, dkk. (2012) dan Agnihotri (2013). Keduanya menggunakan sensor temperatur. Bedanya, Gupta menggunakan termistor dengan sistem berbasis ATmega1284p dan tampilan hasil ukur pada LCD, sedangkan Agnihotri menggunakan sensor TMP100 dan komunikasi serial dengan antarmuka I2C. Kelemahan pada alat yang dihasilkan Gupta adalah bahwa hasil pengukuran hanya dapat ditampilkan hanya ketika tombol LCD ditahan selama proses pengukuran berlangsung. Adapun

kelemahan pada alat yang dihasilkan Agnihotri adalah belum mampu mengukur laju pernapasan untuk kondisi relawan yang beraktivitas ringan.

Penelitian yang akan dilakukan digunakan sensor temperatur jenis IC LM35 yang digunakan hanya sebagai pengindera napas manusia. Sensor LM35 ini akan ditempatkan di dalam *masker* sedemikian, sehingga setiap kali udara keluar melalui hidung maka tegangan sensor berubah, dan perubahan ini digunakan untuk mencacah laju pernapasan manusia dalam keadaan sehat maupun dalam keadaan sakit serta menampilkan keterangan normal atau tidak normal.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan suatu alat ukur laju pernapasan manusia dengan sensor temperatur LM35 dan mikrokontroler ATmega8535 sebagai basis pengendalian sistem pengukuran.

1.3 Manfaat Penelitian

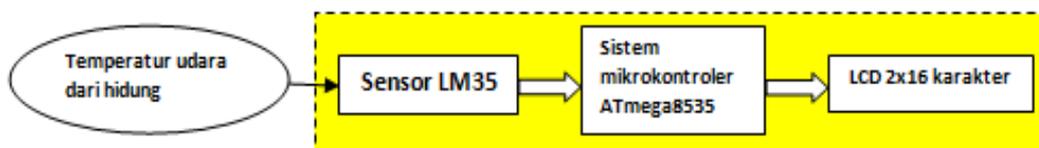
Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat untuk penyediaan alat ukur laju pernapasan yang murah dan mudah, memudahkan kerja para tenaga medis dalam melakukan pemeriksaan kesehatan terhadap pasien di rumah sakit ataupun di puskesmas dan dapat digunakan oleh masyarakat umum.

II. METODOLOGI

Tahapan penelitian ini dimulai dari studi literatur, perancangan diagram sistem blok, perancangan catudaya, pengujian/karakterisasi sistem sensor, perancangan sistem minimum mikrokontroler ATmega8535, perancangan visualisasi alat, pembuatan rangkaian secara permanen (penyolderan, pemasangan alat dan komponen, dan pengaturan sistem rangkaian), perancangan perangkat lunak sistem, pengujian akhir alat, dan pengumpulan data. Bahasa pemrograman yang digunakan adalah BASCOM-AVR.

2.1 Prinsip Kerja

Pertama-tama sensor mendeteksi temperatur pernapasan manusia. Kedua setiap kali udara keluar melalui hidung maka tegangan sensor berubah, dan perubahan ini digunakan untuk mencacah laju pernapasan manusia dalam keadaan sehat maupun dalam keadaan sakit/sekarat serta menampilkan keterangan normal atau tidak normal. Berdasarkan prinsip kerja tersebut, diagram sistem blok alat ukur laju pernapasan manusia ini dirancang seperti Gambar 1.



Gambar 1 Diagram sistem blok alat ukur laju pernapasan manusia.

2.2 Skematik Rangkaian Lengkap Alat Ukur

Rangkaian lengkap alat ukur laju pernapasan ini merupakan gabungan rangkaian catudaya, sistem sensor LM35, rangkaian sistem minimum mikrokontroler ATmega8535, dan rangkaian modul LCD 2x16 karakter seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

V DC (arus searah). IC regulator LM7805 digunakan untuk menghasilkan tegangan 5 V DC yang dibutuhkan rangkaian. Kapasitor digunakan untuk penstabil tegangan sedangkan resistor dan LED digunakan sebagai indikator berfungsi atau tidaknya catudaya. Berdasarkan hasil pengukuran, catudaya menghasilkan tegangan keluaran rata-rata sebesar 5.06 V dimana besar tegangan ini masih aman untuk menjalankan alat dengan baik. Besar tegangan keluaran dari catudaya ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Pengujian tegangan keluaran catudaya

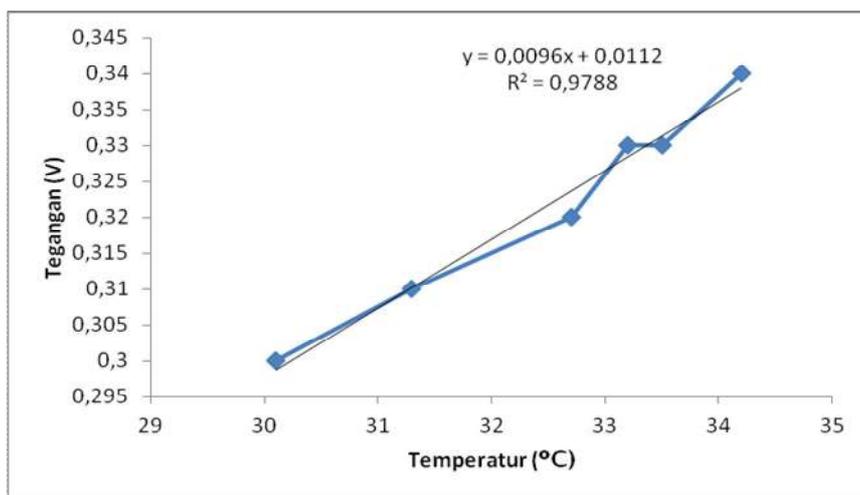
Pengukuran	Tegangan Masukan (V)	Tegangan Keluaran (V)
1	12,00	5,06
2	12,00	5,06
3	12,00	5,06

3.2 Karakterisasi Sensor LM35

Karakterisasi sensor LM35 dilakukan dengan membandingkan variasi temperatur pernapasan manusia dengan tegangan keluaran sensor di multimeter digital dengan cara termometer digital dipasang bersamaan dengan sensor LM35 di dalam *masker* oksigen. Alat ukur temperatur yang digunakan adalah termometer digital. Hasil pengujian sensor LM35 dapat dilihat pada Tabel 2. Grafik hubungan antara tegangan dan temperatur dapat dilihat pada Gambar 4.

Tabel 2 Pengujian sensor LM35

No	Temperatur (°C)	Tegangan (V)
1	30,1	0,30
2	31,3	0,31
3	32,7	0,32
4	33,2	0,33
5	33,5	0,33
6	34,2	0,34
7	34,7	0,34
Rata	32,8	0,324



Gambar 4 Hubungan temperatur dengan tegangan

Dari Gambar 4 dapat dilihat tegangan dan temperatur mempunyai hubungan linier dengan koefisien korelasi karakterisasi 0,9788 sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor LM35 memiliki linieritas yang tinggi, keakuratan yang tinggi dan sudah sesuai dengan karakteristik yang ditetapkan sehingga dapat digunakan untuk pengukuran laju pernapasan manusia.

3.3 Pengujian Alat

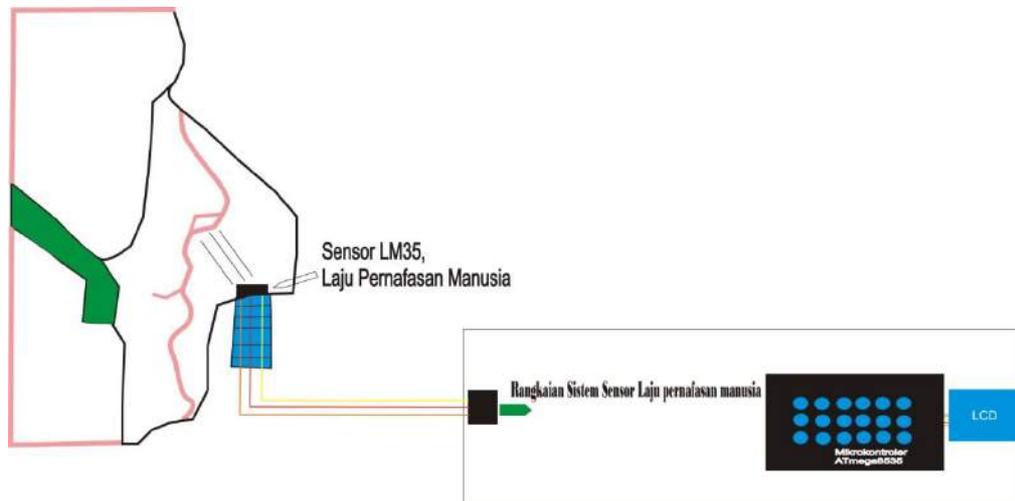
Pengujian alat dilakukan dengan mengambil data jumlah total napas manusia dan membandingkan antara alat ukur yang dirancang dengan stetoskop. Data pengujian alat secara keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 3. Dari Tabel 3 dapat diketahui besar ketepatan alat ukur laju pernapasan memiliki rata-rata 96,5% sehingga persentase kesalahan 3,5%.

Tabel 3 Pengujian alat secara keseluruhan

No	Subyek Pengukuran	Usia	Keadaan Ketika Diukur	Hasil Pengukuran (Napas/Menit)		Persentase Ketepatan (%)
				Alat	Stetoskop	
1	Relawan 1	19	Jalan dari Dekanat Ke Labor	20	20	100
2	Relawan 2	20	Penderita Asma	19	19	100
3	Relawan 3	21	Jalan dari Gd I Ke Labor	27	27	100
4	Relawan 4	22	Pernah Sakit Paru-Paru	20	19	94,7
5	Relawan 5	23	Sedang Penelitian	19	18	94,4
6	Relawan 6	23	Santai	19	18	94,4
7	Relawan 7	25	Santai	18	19	94,7
8	Relawan 8	26	Setelah Olahraga <i>push-up</i>	24	26	92,3
9	Relawan 9	27	Santai	19	18	94,4
10	Relawan 10	28	Santai	20	20	100
Rata-Rata						96,5

3.4 Visualisasi dan Hasil Akhir Alat

Bentuk fisik alat dalam penelitian ini dirancang dalam konteks rancang bangun. Pada pengaplikasiannya, sistem sensor ini dipasang di dalam *masker* oksigen agar sensor tidak mendapat pengaruh dari temperatur udara lingkungan sekitar sehingga temperatur yang diterima sensor hanya udara keluar dari hidung seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

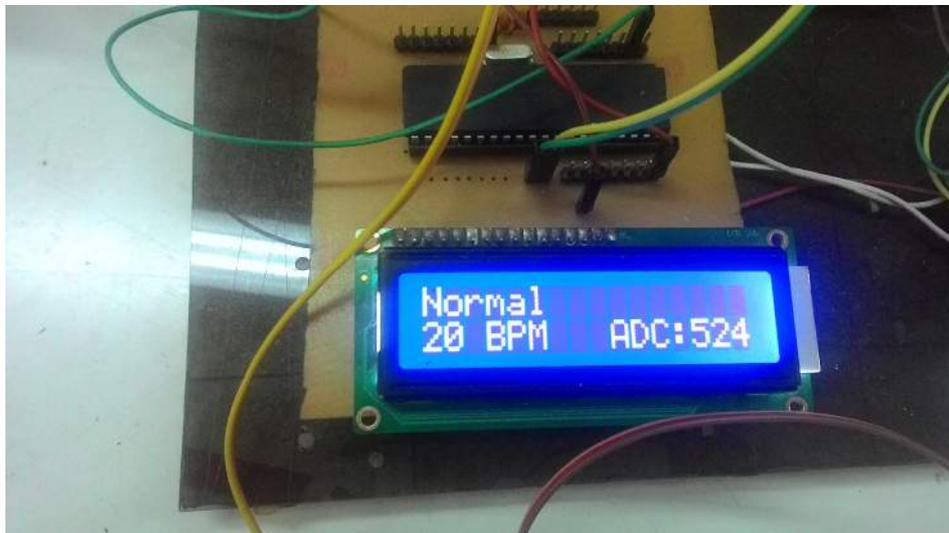


Gambar 5 Visualisasi alat

Dalam pengukuran laju pernapasan manusia ini menggunakan sistem *counter* yaitu perhitungan dilakukan setiap satu menit. Pada mikrokontroler ATmega8535 sudah terdapat ADC, dan ADC ini berfungsi untuk mengonversi sinyal analog menjadi kode-kode digital yang mempresentasikan besar sinyal analog tersebut. Hasil pengujian laju pernapasan manusia menggunakan sensor LM35, ditampilkan pada LCD ditunjukkan pada Gambar 6.

Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, yaitu Gupta dkk (2012) dan Agnihotri (2013). Dilihat dari hasil rancangan alat Gupta hasil pengukuran dapat menampilkan laju pernapasan akan tetapi hasil pengukuran dapat ditampilkan hanya ketika tombol LCD ditahan selama proses

pengukuran berlangsung. Adapun pada alat yang dihasilkan Agnihotri adalah dapat menampilkan laju pernapasan dan temperatur namun belum mampu mengukur laju pernapasan untuk kondisi relawan yang beraktivitas ringan. Kelemahan yang lain dari kedua peneliti tidak menampilkan analisis pengukuran laju pernapasan sehingga alat ukur tidak dapat digunakan untuk masyarakat umum.



Gambar 6 Sistem Alat Ukur laju pernapasan yang dihasilkan

Berdasarkan hasil pengamatan, LCD menampilkan “20 BPM” merupakan hasil laju pernapasan manusia, “BPM” adalah singkatan dari *Breaths per minute* merupakan satuan dari laju pernapasan, “normal” adalah hasil analisis pengukuran yang menyatakan laju pernapasan relawan dalam keadaan normal. Dilihat dari fungsi ADC yaitu untuk mengonversi sinyal analog (biasanya berupa tegangan) menjadi kode-kode digital maka “ADC:524” menunjukkan sensitivitas sensor yang berarti temperatur pernapasan relawan terdeteksi dengan sinyal ADC sebesar 524. Hasil rancangan alat ukur hanya dapat digunakan untuk orang dewasa, sehingga penelitian selanjutnya dapat dilanjutkan rancang-bangun alat ukur untuk semua umur.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa alat ukur yang dirancang telah dapat bekerja seperti yang telah direncanakan baik untuk kondisi pernapasan normal maupun kondisi pernapasan setelah beraktivitas berat. Sensitivitas sensor LM35 yang digunakan pada penelitian ini $9,6 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. Linieritas sensor LM35 yang digunakan pada penelitian ini cukup baik dengan derajat korelasi linier sebesar 0,9788. Alat ukur memiliki akurasi rata-rata 96,5%. Alat ukur laju pernapasan ini telah dirancang untuk dapat digunakan dengan catudaya dari PLN maupun catudaya dari baterai 9 V. Agar pengukuran laju pernapasan manusia dapat dilakukan untuk semua umur maka perlu ditambahkan tombol *keypad*.

DAFTAR PUSTAKA

- Agnihotri, A., 2013, Human Body Respiration Measurement Using Digital Temperature Sensor with I2c Interface, *International Journal of Scientific and Research Publications*, Volume 3, Issue 3, University of R.G.P.V, Bhopal, (M.P).
- Braun, S.R., 1990, *Clinical Methods: The History, Physical, and Laboratory Examinations*, Butterworth Publishers, Stoneham, MA.
- British Medical Association, 2005, *Illustrated Medical Dictionary*, A Dorling Kindersley Book, London.
- Das, S., 2013, Development Of A Respiration Rate Meter–A Low-Cost Design Approach, *Health Informatics-An International Journal (HIJ)*, Vol.2, No.2.
- Mathew, J., Semenova, Y., dan Farrell, G., 2012, A Miniature Optical Breathing Sensor, *Biomedical Optics Express*, Optical Society of America, December 2012 / Vol. 3, No. 12.
- Gupta, M., dan Qudsi, H., 2012, Thermistor Respiratory Monitor, Electrical and Computer Engineering, Cornell University.

OpenStax College, 2013, Anatomy & Physiology, Rice University, Houston, Texas,
<http://cnx.org/content/col11496/latest/>, diakses Februari 2015.

Royal College of Nursing, 2013, Standards for Assessing, Measuring and Monitoring Vital Signs In
Infants, Children and Young People, London, Inggris.

http://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/FinalProjects/f2012/htq2_mg573/htq2_mg573/,
diakses juni 2015.

SENSOR PLANAR INDUKTIF BERBASIS BAHAN PCB FR-4 UNTUK PENGUKURAN JARAK KECIL

Usman Malik, Rahmondia N. Setiadi, Lazuardi Umar

Jurusan Fisika FMIPA Universitas Riau, Pekanbaru

Kampus Bina Widya Sp. Baru 28293 Pekanbaru

Email: usmanmalik@unri.ac.id

ABSTRAK

Sensor koil datar berbahan PCB FR4 telah didesain sebagai sensor induktif untuk pengukuran jarak kecil. Sensor didesain dan dicetak mempergunakan bahan *printed circuit board* (PCB) jenis FR4 yang merupakan bahan *glass-reinforced epoxy laminate sheets* dengan ketebalan lapisan 35 μ m. Perubahan induktansi akibat variasi jarak kecil dideteksi menggunakan osilator LC pada frekuensi 1-2MHz dan rangkaian beda fasa akan mengubah frekuensi menjadi tegangan keluaran dengan jangkauan pengukuran maksimum adalah 15mm dan resolusi sebesar 0,01mm. Pengaruh suhu diamati dengan mengkarakterisasi sensor pada suhu yang berbeda yaitu mulai suhu 20°C sampai dengan 60°C. Untuk mengakomodir perubahan suhu yang mempengaruhi kualitas pengukuran maka telah dikembangkan model koreksi dengan memasukkan nilai suhu pada saat pengukuran dalam persamaan umum model sensor sehingga perubahan ini dapat dieliminir untuk mengkoreksi perubahan nilai pengukuran pada aplikasi sensor.

Kata kunci: sensor jarak induktif, koil datar, osilator LC, model koreksi suhu

ABSTRACT

Flat coil sensor based on FR4 PCB material has been designed as an inductive sensor for the measurement of small distances. Sensors are designed and printed using printed circuit board (PCB) which is a type of material FR4 glass-reinforced epoxy laminate sheets with a thickness of 35 μ m layer. Inductance changes due to the small distance variation is detected using the LC oscillator circuit frequency and phase difference 1MHz to 2MHz will transform into a frequency output voltage with a maximum measurement range is 15mm and a resolution of 0.01 mm. The influence of temperature was observed by characterizing the sensor at different temperatures starting from 20°C to 60°C. Temperature affect the quality of the measurements was corrected using mathematical equation model of the sensor to eliminated value changes in sensor applications.

Keywords: inductive displacement sensor, flat coil, LC oscillator, mathematical model

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi sensor telah menawarkan paradigma baru untuk bidang komputasi, kontrol, komunikasi dan kolaborasi, baik aplikasi peralatan dalam kehidupan sehari-hari maupun di dalam dunia industri. Hal ini ditunjang oleh faktor kompetisi global, terbatasnya sumber daya dan proteksi lingkungan yang menyebabkan terjadinya kenaikan signifikan dalam teknologi otomatisasi dengan kemampuan yang lebih tinggi dan fungsionalitas yang diperluas.

Pada dunia otomatisasi industri dewasa ini terdapat kebutuhan yang sangat besar untuk mengukur jarak kecil linear maupun sudut (angular) dari suatu objek, yang idealnya dapat dilakukan tanpa adanya kontak mekanis. Pengukuran ini sangat krusial dalam berbagai piranti elektromekanis dan mekatronik yang dipergunakan dalam otomatisasi proses-proses industri (Decker and Kostka, 1989).

Salah satu bidang yang banyak memanfaatkan sensor untuk pengukuran linear dan angular adalah industri automotif, seperti penggunaan sensor angular untuk mengukur bukaan pedal gas, sistem actuator turbocharger, sensor sudut setir mobil, sensor posisi katub, sensor posisi gear box, sensor posisi lampu utama mobil dan sebagainya (Bosch, 2007). Sensor tersebut dituntut tidak saja presisi tetapi juga handal dan bebas perawatan jika bekerja pada alat dengan getaran-getaran berat dan pada suhu dan kelembaban yang berfluktuasi secara ekstrim

Untuk menentukan jarak linier kecil maupun angular dewasa ini terdapat banyak metode seperti metoda optik. Sensor sudut optik terdiri atas sumber cahaya (*transmitter*) dan *photo detector* yang memiliki kelemahan yaitu sensitif terhadap debu dan Metode lainnya adalah potensiometris yang mendeteksi perubahan kecil nilai resistansi yang proportional terhadap perubahan jarak linier maupun angular. Kelebihan metode ini adalah konstruksi yang sederhana dan akurasi tinggi tetapi memiliki kelemahan yaitu histeris mekanis dan sulit untuk diminiaturisasi. Metode kapasitif bekerja dengan

mengukur perubahan jarak menjadi arus, namun memiliki kelemahan rentang pengukuran terbatas (Boby et al, 2008). Sementara sensor induktif bekerja dengan mendeteksi perubahan medan magnetik dalam menentukan posisi angular suatu benda (Hella, 2003). Oleh karena tidak terdapat kontak fisik dengan objek ukur sehingga memiliki faktor durabilitas yang sangat baik (Marioli et al, 2003).

Peluang pengembangan sensor posisi jarak kecil linier dan angular untuk aplikasi dunia otomotif di Indonesia masih besar seperti pengembangan industri otomotif nasional. Untuk mendukung industri otomotif nasional ini diperlukan banyak komponen dan salah satunya adalah sensor untuk berbagai keperluan deteksi.

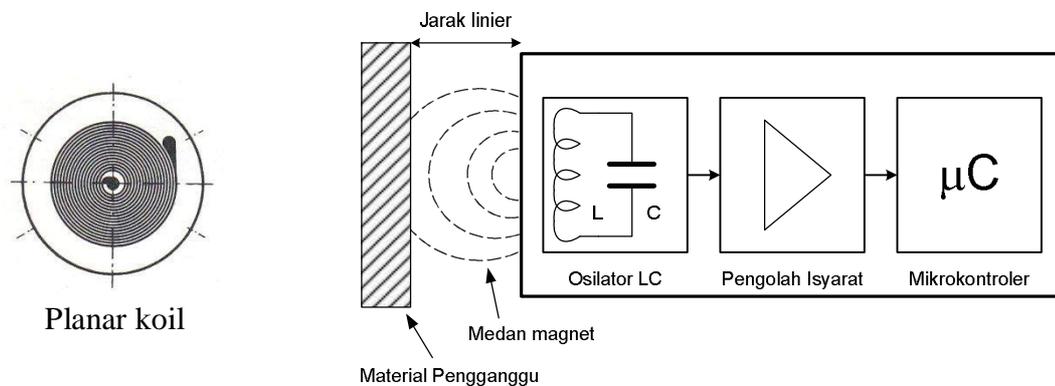
Pada paper ini dijelaskan sensor koil datar berbahan PCB FR4 yang didesain sebagai sensor induktif untuk pengukuran jarak kecil. Sensor didesain dan dicetak mempergunakan bahan *printed circuit board* (PCB) jenis FR4 yang merupakan bahan *glass-reinforced epoxy* laminate sheets dengan ketebalan lapisan 35 μ m. Perubahan induktansi akibat variasi jarak kecil dideteksi menggunakan osilator LC pada frekuensi sampai 2MHz dan pengaruh suhu diamati dengan mengkarakterisasi sensor pada suhu yang berbeda yaitu mulai suhu 20°C sampai dengan 60°C.

II. METODOLOGI

2.1 Prinsip Kerja Sensor Induktif Jarak Kecil

Penggunaan sensor induktif seperti dijelaskan oleh Lemarquand (1992) dipergunakan dalam sistem otomatisasi pengukuran skala mikro. Sistem deteksi ini juga dilengkapi dengan fitur *smart* yang meningkatkan akurasi pengukuran (Hlubeck, 2000). Sementara Horsky(2005) menerangkan fungsi sensor induktif dapat dipergunakan pada bidang otomotif serta bidang otomatisasi baik untuk industri maupun untuk penggunaan sektor pribadi.

Sensor induktif dikenal memiliki ketahanan terhadap kondisi lingkungan. Sensor ini dipergunakan sebagai detektor dengan memanfaatkan sifat arus *Eddy* (*Eddy Current*) pada objek ukur, terutama berkaitan dengan material non-ferromagnetik. Desain pembuatan sensor induktif pada penelitian ini berbentuk planar koil yang akan menghasilkan medan magnetik bolak balik pada ujung probe, lihat Gambar 1.

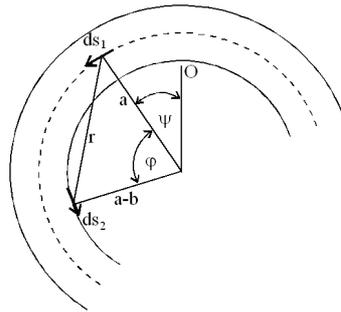


Gambar 1 Blok diagram sensor induktif planar koil memanfaatkan Eddy Current

Bila terdapat suatu material konduktif (objek pengganggu) di dekat medan magnetiknya maka medan akan menginduksi sejumlah kecil arus Eddy dalam material. Arus ini menghasilkan medan magnetik yang berlawanan dengan medan dari sensor. Interaksi antara kedua medan magnetik ini akan berubah jika terdapat jarak antara sensor dengan material pengganggu (*target*). Rangkaian elektronik sensor kemudian mengukur interaksi medan ini dan membangkitkan tegangan keluaran yang proporsional dengan perubahan jarak diantara sensor dengan objek.

2.2 Induktansi Planar Koil Sensor

Sensor planar koil berbentuk lingkaran koil dengan jumlah lilitan tertentu. Pada aplikasinya, koil akan mempunyai dua jenis induktansi yang disebabkan arus bolak balik yaitu self-induktansi dan mutual induktansi (Rahmondia, 2009). Untuk mempermudah perhitungan induktansi maka koil dianggap tersusun sebagai lapisan koaksial. Misal radius cincin koaksial a dengan radius internal adalah $a-b$ dimana radius $b < a$ seperti Gambar (2) berikut ini :



Gambar 2. Induktansi diri pada simpal-kawat sirkular

Pada kasus konduktor dengan penampang sirkular, induktansi diri dari elemen koil datar untuk lilitan ke- j adalah

$$L_j = \frac{\mu_0}{2} a_j \sqrt{1-b/a_j} \left[\left(\frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) \right] \quad (1)$$

Besarnya induktansi yang disebabkan oleh induksi arus Eddy pada objek target (induktansi mutual) dari elemen koil datar dengan jumlah lilitan tertentu adalah

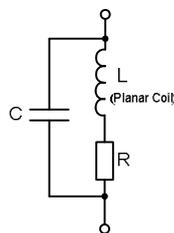
$$M_{jk} = \frac{\mu_0 \sqrt{a_1 a_2}}{k_{jk}} \left[\left(2 - k_{jk}^2 \right) K(k_{jk}) - \frac{2}{k} E(k_{jk}) \right] \quad (2)$$

Koefisien a adalah jari-jari lingkaran, d jarak antara elemen koil datar dengan objek, $a-b$ adalah setengah lebar lintasan elemen koil datar. Besar induktansi elemen koil datar keseluruhan dapat ditulis seperti berikut :

$$L = \sum_{j=1}^N L_j + \sum_{j,k=1}^N M_{jk} \quad (3)$$

dimana j adalah jumlah lilitan dari elemen koil datar dan k adalah jumlah lilitan yang terbentuk pada membran pengganggu.

Perubahan jarak angular antara sensor dan objek akan menyebabkan perubahan induktansi dari sensor planar koil. Untuk mengevaluasi perubahan ini dipergunakan suatu osilator LC yang berfungsi optimal dengan rangkaian umpan balik. Rangkaian umpan balik dirancang memberikan tegangan umpan balik yang fasanya sama dengan sinyal input. Osilator LC bekerja pada frekuensi 500 kHz keatas yang cenderung menggunakan induktor dan kapasitor sebagai bagian pengendali frekuensi (Traenkler, 1990). Bentuk suatu osilator LC diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Rangkaian penala (*tank circuit*) dari osilator LC

Dari sudut fasa $ImZ=0$ ditentukan frekuensi resonansi ω_0 menjadi

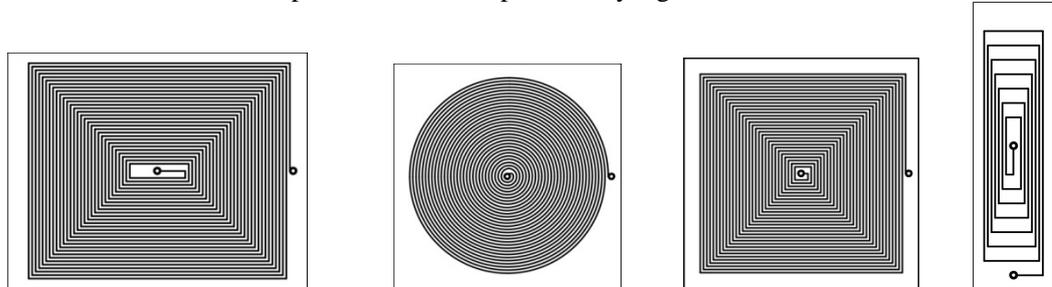
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \left(1 - \frac{1}{2Q^2} \right) \quad (4)$$

Rangkaian ini juga memiliki kelemahan yaitu terjadinya drift frekuensi keluaran akibat faktor suhu dan faktor penuaan (Passeraub, 2000). Informasi yang diberikan oleh sensor planar dievaluasi oleh osilator LC, sementara parameter lingkungan yaitu suhu, diukur mempergunakan sensor suhu tambahan.

2.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini direncanakan berlangsung mengikuti pola penelitian eksperimental dimana pendekatan teoritis pertama dibuka. Kemudian verifikasi dilaksanakan berdasarkan eksperimen yang dibuat untuk memastikan bahwa hasil yang diperoleh konsisten.

Fabrikasi sensor planar dilakukan dengan mendesain beberapa bentuk yang umum dan khusus mempergunakan fasilitas *Software Protel* dan *Corel Draw*. Untuk pembuatan sensor planar mempergunakan basis *printed circuit board*(PCB) dengan lebar *track* sebesar 0,25mm. Dimensi sensor mempengaruhi faktor induktansi dan lebar permukaan yang akan diganggu oleh material magnetik. Gambar 4 berikut memperlihatkan beberapa variasi yang akan dibuat.



Gambar 4 Variasi bentuk beberapa *planar coil* untuk sensor *angular*

Besarnya induktansi yang diperoleh masing-masing sensor planar tergantung pada jumlah lilitan jari-jari lingkaran, jarak antara elemen koil datar dengan objek, dan lebar lintasan elemen koil datar, seperti dijelaskan pada persamaan 3. Pengujian dan karakterisasi parameter koil yaitu induktansi L , kapasitansi C , resistansi R , Impedansi Z , faktor kualitas Q sebagai fungsi dari frekuensi dilakukan mempergunakan LCR meter pada variasi frekuensi eksitasi. Dengan demikian diperoleh karakteristik sensor pada beberapa frekuensi kerja sehingga memudahkan dalam mendesain osilator LC dan RC sebagai rangkaian evaluasi.

Perubahan jarak linier sensor planar dengan objek pengganggu dievaluasi mempergunakan rangkaian osilator LC dengan frekuensi keluaran seperti pada persamaan 4. Sensor ditempatkan pada suatu set up eksperimen mempergunakan mikrometer sekrup sebagai kontrol posisi linier dimana perubahan jarak kecil linier dievaluasi mempergunakan rangkaian osilator LC dan detektor fasa yang akan mengubah besaran frekuensi menjadi tegangan. Evaluasi pengaruh suhu luar dilakukan dengan memberikan variasi suhu pada sensor dan pengaruh suhu kemudian dimasukkan ke dalam algoritma deteksi sehingga dapat direduksi.

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Pengukuran Nilai RCL Sensor

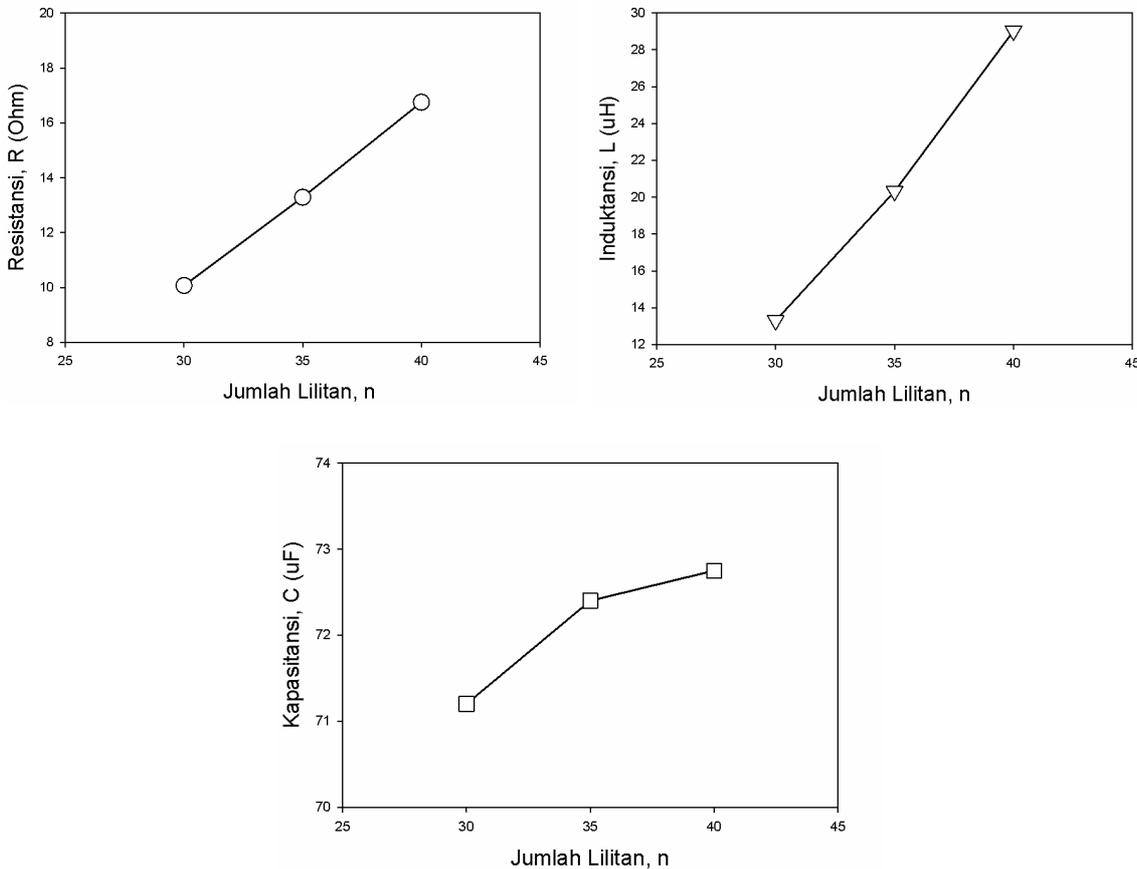
Sensor koil datar pada penelitian ini dirancang menggunakan aplikasi desain grafis Corel Draw dan Protel SE99 dengan memperhatikan ukuran atau dimensi, jumlah lilitan (N), bentuk geometri serta jarak antar jalur (*tracking*). Variasi rancangan dimensi dan geometri Sensor Koil Datar diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter pembuatan sensor koil datar

No	Geometri	Jumlah Lilitan (n)	Luas Penampang (mm ²)	Diameter/ Diagonal (mm)	Jarak Jalur (mm)
1	Lingkaran	30	3025	30	0.25
		35	3300	35	0.25
		40	3600	40	0.25
2	Persegi	30	3224	45	0.25
		35	3410	50	0.25
		40	3844	55	0.25
3	Persegi Panjang	30	5772	62	0.25
		35	7280	65	0.25 – 0.5
		40	7605	73	0.25 – 0.5

Desain sensor yang dirancang kemudian dicetak pada bahan PCB (*Printed Circuit Board*) jenis FR4 yang memiliki material jalur berupa campuran antara tembaga-perak (*Ag-Cu*) yang terletak diatas substrat pertinaks. Pada penelitian ini telah dipilih bentuk geometri lingkaran karena lebih mudah dibuat dan memiliki kemudahan dalam aplikasinya.

Untuk melihat nilai tahanan R , kapasitansi C dan induktansi L dari sensor dilakukan karakterisasi sifat fisis sensor mempergunakan RCL meter dengan frekuensi tetap 1KHz. Berikut adalah hasil karakterisasi sensor dengan berbagai bentuk.



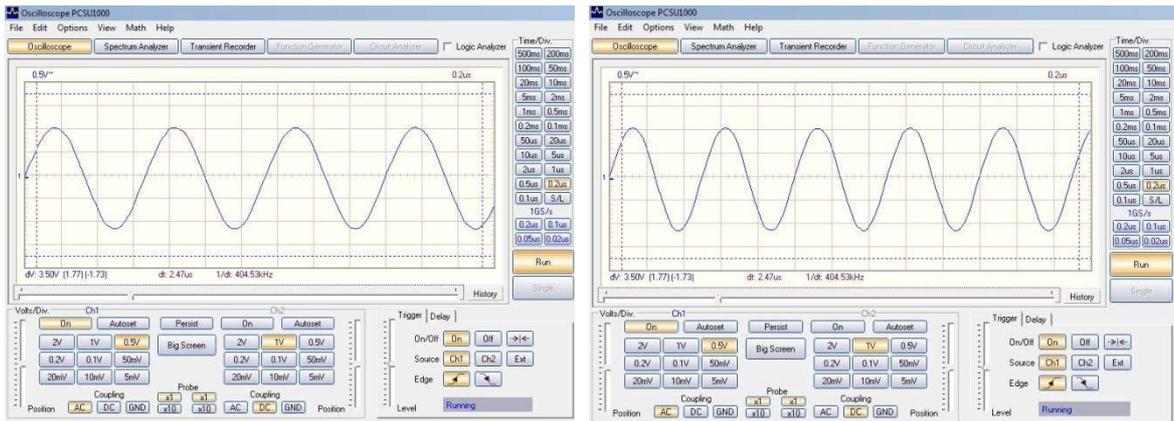
Gambar 5. Nilai RCL sensor planar koil lingkaran

Hasil karakterisasi resistansi (R) dengan nilai terbesar pada sensor koil datar berbentuk lingkaran ditunjukkan pada jumlah lilitan lilitan (N) 40 adalah $16,75 \Omega$. Resistansi (R) bertambah secara linear dengan pertambahan jumlah lilitan. Induktansi pada sensor meningkat secara tajam pada jumlah lilitan 40 dengan nilai sebesar $29,02\mu\text{H}$. Nilai kapasitansi pada tiap lilitan relatif sama dikarenakan substrat penyusun serta jarak antar jalur sensor dibuat sejenis (*homogen*) antara sensor pada jumlah lilitan 30, 35 ataupun 40.

3.2 Karakterisasi Dengan Osilator LC

Pengukuran dan pengujian sensor induktif dilakukan menggunakan suatu rangkaian osilator LC dengan bagian pengendali penala frekuensi (*tank circuit*) berupa bagian induktif L dan kapasitif C . Frekuensi keluaran osilator akan diubah menjadi tegangan mempergunakan f/V converter sehingga lebih mudah dibaca oleh rangkaian pengukur digital biasa dan ADC untuk diteruskan ke mikrokontroler.

Realisasi osilator LC mempergunakan inverter dari IC 4007 yang merupakan *Dual Complementary Pair Plus Inverter* yang terdiri atas masing-masing 3 N -channel dan P -channel *enhancement mode devices packaged*, yang dilengkapi rangkaian penala (*tank circuit*) eksternal mempergunakan induktansi dan kapasitansi. Frekuensi keluaran dari osilator 1-3MHz dan diukur mempergunakan *frequency counter* Philips Digital PM3382 dan USB Osiloskop Velleman PCSU1000 yang dapat secara digital mengakuisisi keluaran dari osiloskop. Output yang dihasilkan berbentuk sinusoida. Nilai frekuensi osilator yang dirancang adalah mulai 1,5MHz dan 2,0MHz seperti diperlihatkan pada Gambar 6 berikut.

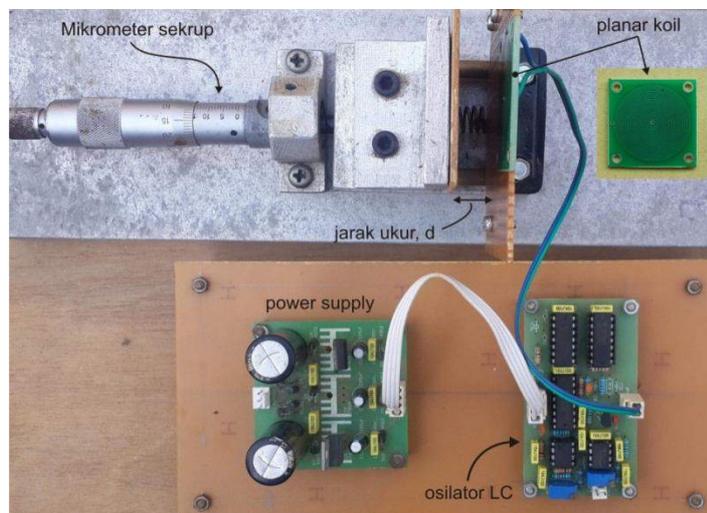


Gambar 6. Frekuensi keluaran osilator pada 1,5Mhz dan 2,0Mhz

Pengukuran suhu diperlukan pada penelitian ini karena suhu berpengaruh pada frekuensi osilasi dari osilator yang akan menimbulkan drift frekuensi. Oleh sebab itu, pengaruh suhu akan dieliminir dengan memasukkan faktor suhu dalam algoritma deteksi sensor sudut ini sehingga keakuratan pengukuran akibat pengaruh suhu luar dapat dijaga. Sensor yang akan dipergunakan adalah jenis sensor suhu PT100 Air probes, diameter 6mm, three-wires cable. Tahanan sensor ini akan bervariasi dengan perubahan suhu, sensor PT100 memiliki resistansi 100Ω pada 0°C dan variasi koefisien suhu $0,00385\Omega$ tiap $^\circ\text{C}$.

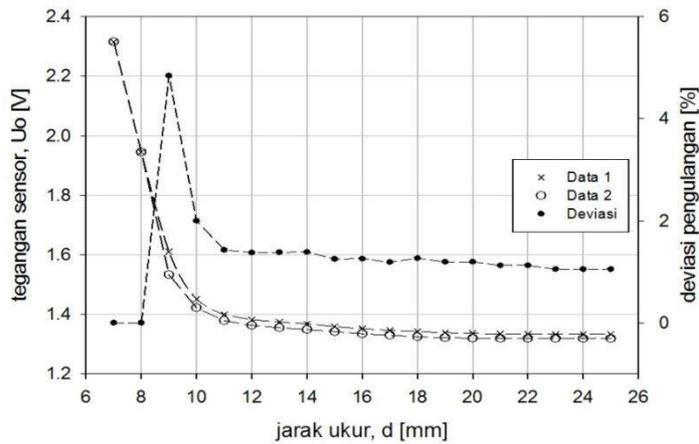
3.3 Uji coba Sensor Koil Datar Mempergunakan Mikrometer Sekrup

Pengujian sensor koil datar (planar koil) dilakukan mempergunakan set up percobaan seperti dibawah ini yang terdiri atas mikrometer sekrup dengan dudukan dari bahan alu Dural, sensor koil datar dengan rangkaian pengolah isyarat dan rangkaian power supply.



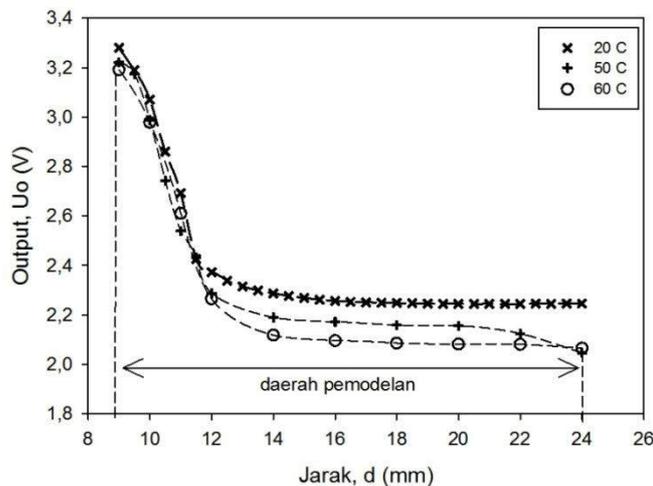
Gambar 7. Rangkaian osilator LC dan susunan eksperimen

Pengujian tahap pertama hubungan antara tegangan keluaran sebagai fungsi jarak translasi dari sensor diperlihatkan pada Gambar 8. Untuk menguji konsistensi sensor di jangkauan pengukurannya maka dilakukan pengukuran berulang sehingga diperoleh kurva yang saling berkoinidensi dengan deviasi maksimum 4%. Perubahan ini boleh jadi disebabkan oleh perubahan suhu atau pengaturan jarak mempergunakan micrometer yang tidak pas sehingga diperoleh nilai yang sedikit berbeda. Namun, dengan mempergunakan pemodelan dan statistik akan diperoleh kurva yang mewakili karakteristik sensor.



Gambar 8 Perubahan nilai induktansi dan tegangan pada variasi jarak

Untuk perubahan suhu pada pengukuran sensor datar maka alat dikarakterisasi pada suhu yang berbeda yaitu pada suhu 20°C, 50°C dan 60°C (Gambar 9). Suhu sebesar 20°C diperoleh dengan mengkarakterisasi sensor dan rangkaian pada ruangan dengan suhu konstan 20°C, sementara suhu 50°C dan 60°C dilakukan dengan menempatkan rangkaian pada ruang terkontrol suhu Termostat Heraus Instrumen yang dapat mengatur suhu sampai dengan 300°C. Dari ketiga hasil pengukuran memperlihatkan bahwa sensor memiliki kurva yang sama dengan kecenderungan turun secara eksponensial (non linier) sesuai dengan persamaan koil datar. Dari rentang pengukuran yang ada tidak semua daerah bisa dipergunakan sehingga hanya daerah pemodelan saja yang akan diolah lebih lanjut yaitu dari 9mm sampai dengan 24mm atau sebesar 15mm rentang pengukuran, dengan resolusi 0,01mm.



Gambar 9. Pemodelan dan konversi kurva sensor koil datar pada 3 suhu berbeda

Adapun persamaan umum dari tiap kurva adalah:

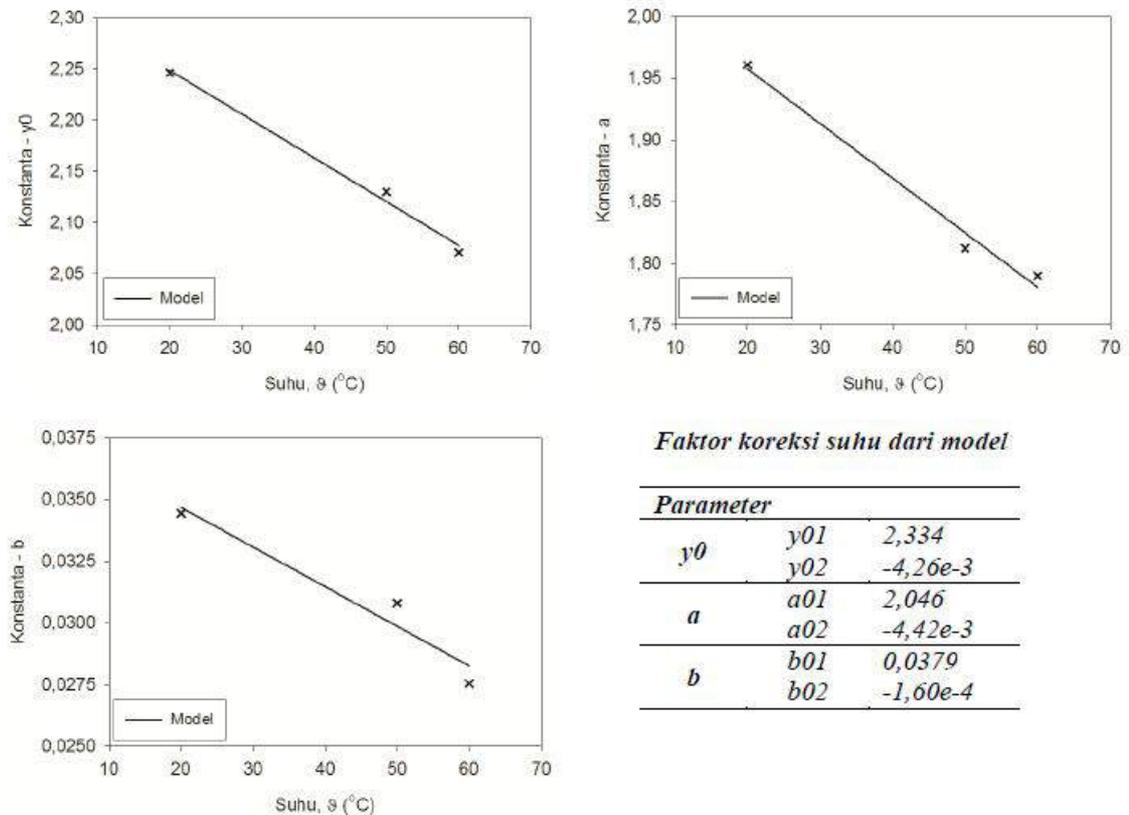
$$U_o(\vartheta) = y_0 + a \cdot \exp(-b\theta)$$

dimana f adalah frekuensi keluaran, θ adalah sudut dan y_0 , a dan b merupakan konstanta persamaan seperti diberikan pada Tabel 2 berikut ini:

Tabel 2. Parameter model sensor koil datar pada 3 suhu yang berbeda

Suhu Karakterisasi (°C)	Parameter Model		
	y_0	a	B
20	2,2463	1,9606	0,0344
50	2,1300	1,8121	0,0308
60	2,0710	1,7899	0,0276

Seperti diperlihatkan pada Tabel 2 dan Gambar 9 terlihat bahwa masing-masing konstanta y_0 , a dan b menunjukkan pengaruh suhu pada pengukuran. Untuk itu dilakukan koreksi suhu untuk masing-masing parameter ini dengan memodelkan sehingga diperoleh faktor koreksi suhu dari masing-masing parameter seperti Gambar 10 berikut.



Gambar 10. Koreksi suhu pemodelan kurva dari sensor jarak

Berdasarkan hasil pada Gambar 10 terlihat bahwa hubungan antara suhu dan koefisien model memberikan fungsi linier dan menghasilkan konstanta-konstanta koreksi suhu. Adapun bentuk persamaan umum dengan faktor koreksi suhu adalah:

$$U_0 = (y_{01} + y_{02} \cdot \vartheta) + (a_{01} + a_{02} \cdot \vartheta) \cdot \exp(-(b_{01} + b_{02} \cdot \vartheta)\theta)$$

Berdasarkan persamaan empiris ini maka untuk aplikasi selanjutnya adalah sensor sudut dilengkapi dengan sensor suhu yang secara rutin akan mengukur suhu lingkungan. Jika besarnya tegangan keluaran terukur dan konstanta koreksi suhu diketahui maka akan diperoleh nilai sudut yang bersesuaian.

IV. KESIMPULAN

Dari penelitian ini diperoleh kesimpulan bahwa terdapat perubahan signifikan dari perubahan frekuensi dan tegangan keluaran dari sensor yang diakibatkan perubahan jarak translasi dari objek yang berada di dalam daerah medan magnetik sensor memanfaatkan efek Eddy Current. Penelitian ini potensial untuk dikembangkan selanjutnya khususnya sebagai engsel elektronik dimana perubahan jarak translasi akan diubah menjadi rotasi (gerakan angular) sehingga dapat dipergunakan untuk mengukur sudut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai oleh dana penelitian Hibah Bersaing tahun 2015 dari DP2M Direktorat Pendidikan Tinggi Kementerian Riset Teknologi Dikti Republik Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Boby G., N. Madhu Mohan dan V. Jagadeesh Kumar, 2008. A Linear Variable Differential Capacitive Transducer for Sensing Planar Angles, *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, Vol. 57, No. 4, April 2008, 736 – 742.
- Bosch, 2007. Sensors – the vehicle’s “Sensory System, *Technical Information*, Bosch GmbH, Germany.
- Decker, W. and Kostka, P., 1989. Inductive and eddy current sensors. In: Gopel, W., Hesse, J. and Zemel, J. N. (Eds.), *Sensors: A Comprehensive Survey*, Vol. 5, Chapter 7. VCH, Weinheim, 300–304.
- Hella, 2003. *Contactless Sensors for X-By-Wire Systems*, Technical Information, He Hueck & Co. Rixbecker Straße 75 59552 Lippstadt Germany.
- Hlubeck B., Hobein D. 2000. *Smart Sensor Technology - The Basic for Perfect Performance*, ATZ 102 (12).
- Horsky, P. 2005. LC Oscillator Driver for Safety Critical Applications. *Proc. of DATE 05 Conference*, Designers Forum, Munich, Germany, 34-38.
- Lemarquand, V. dan Lemarquand, G., 1992. Inductive Absolute Angular Position Sensor, *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol. 28. No. 5, 2199- 2201.
- Marioli, D., Sardini E., dan Taroni A., 2003. Flat Type Thick Film Inductive Sensors, *Active and Passive Elec. Comp.*, Vol. 26(1), 37–49.
- Passeraub, Ph. A., Besse, P. A. dan Popovic, R. S., 2000. Temperature compensation of an integrated low power inductive proximity microsensor. *Sensors and Actuators A*, 82, 62–68.
- Rahmondia NS, 2009. Desain dan Pembuatan Sensor Getaran Frekuensi Rendah Berbasis Koil Datar, *Thesis S2*, Jurusan Fisika FMIPA ITB Bandung.
- Traenkler, H.-R., 1990. *Taschenbuch der Messtechnik mit Schwerpunkt Sensortechnik*, 2., Auflage, Oldenbourg Verlag, Muenchen.

RANCANG BANGUN SISTEM PENINGKAT KADAR O₂ DALAM RUANG DENGAN MEMANFAATKAN PROSES ELEKTROLISIS

Meqorry Yusfi¹, Amirsyah², Derisma²

¹ Jurusan Fisika FMIPA Universitas Andalas

² Jurusan Sistem Komputer FTI Universitas Andalas

Jln. Kampus Limau Manis Kota Padang 25163

email : meqorry@fmipa.unand.ac.id

ABSTRAK

Telah dirancang bangun sebuah *prototype* yang dapat meningkatkan kadar oksigen(O₂) dalam ruangan dengan memanfaatkan proses elektrolisis air. Kadar oksigen dideteksi dengan menggunakan sensor gas KE50 kemudian tegangan keluaran sensor dikuatkan dengan menggunakan penguat non-inverting sebanyak 21,5 kali. Setelah dikuatkan maka tegangan akan diteruskan ke mikrokontroler ATMega8535 dan kemudian dilanjutkan ke proses elektrolisis. Tegangan pada proses elektrolisis dibagi menjadi dua bagian yaitu dengan daya penuh dan setengah penuh, untuk melihat pengaruh tegangan pada proses elektrolisis. Hasil pengujian diperoleh bahwa jika diberikan daya penuh maka akan menghasilkan kadar oksigen yang lebih besar dibandingkan dengan daya setengah penuh. Elektrolisis dengan daya penuh mampu menetralkan kadar oksigen dalam ruangan dengan menghasilkan 47,515 ppm dalam selang waktu 60 menit setelah diberikan asap pada ruangan, berbeda dengan penggunaan daya setengah penuh yang hanya dapat menaikkan kadar oksigen sebesar 20,525 ppm.
Kata Kunci : Sensor KE50, ATMega8535, Elektrolisis.

ABSTRACT

*A prototype of a room to increase oxygen (O₂) concentration using water electrolysis process has been designed and constructed. O₂ concentration is detected using KE50 sensor. Output of sensor is amplified using non-inverting amplifier with 21.5 gains. ATMega8535 microcontroller is connected to output of amplifier and then the output of microcontroller is continued to electrolysis process. The voltage input of electrolysis process is divided in two parts: full cycle and half cycle to see the effect of different voltage in the process. The testing result showed that full cycle produced more O₂ concentration than half cycled. After smoke is given to room, full cycle is able to neutralized O₂ concentration in a room by producing 47.515 ppm, while half cycle just increasing 20.525 ppm O₂ concentration in 60 minutes.
Keywords : KE50 sensor, ATMega8535, Electrolysis*

I. PENDAHULUAN

Oksigen merupakan sumber energi terbesar di dalam udara. Pada keadaan normal memiliki kadar 20-21 % (200.000-210.000 ppm). Presentase ini hampir tetap karena adanya proses fotosintesis (Sunarya, 2007). Oksigen merupakan suatu unsur penting tubuh manusia yang dibutuhkan untuk pernafasan, peredaran darah, fungsi otak, penyingkiran bahan buangan serta pertumbuhan sel .

Elektrolisis air merupakan salah satu metode untuk menghasilkan oksigen. Dengan mengalirkan arus searah (DC) ke elektrodanya maka akan terjadi reaksi kimia penguraian air menjadi oksigen (O₂) dan hidrogen (H₂O). Gas oksigen dari hasil proses elektrolisis tersebut dapat digunakan untuk meningkatkan konsentrasi oksigen dalam ruangan (Rezki, 2012). Gas hasil dari proses elektrolisis tersebut (H₂) juga dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam berbagai kebutuhan seperti bahan bakar kompor dan las. Elektrolisis merupakan proses kimia yang mengubah energi listrik menjadi energi kimia. Elektrolisis dapat dimanfaatkan untuk pemurnian zat dan menghasilkan zat seperti oksigen dan uap. Molekul air dapat diurai menjadi unsur-unsur asalnya dengan mengalirkan arus listrik. Proses penguraian unsur-unsur pembentuk air disebut elektrolisis air. Reaksi elektrolisis air dapat ditulis sebagai berikut (Sunarya, 2007) :

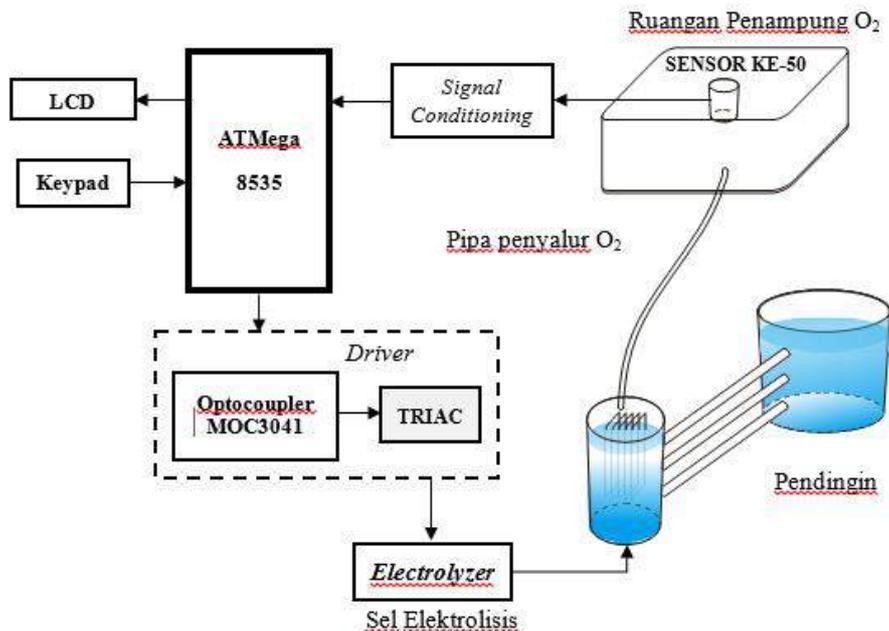


Apabila terjadinya gangguan pada ruangan seperti gangguan asap rokok, maka kadar oksigen dalam udara akan berkurang sehingga udara yang dihirup menjadi tidak sehat. Dengan adanya sistem elektrolisis diharapkan dapat memurnikan kembali udara dalam ruangan dengan cara menghasilkan kadar oksigen yang lebih tinggi. Oleh sebab itu penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh proses

elektrolisis dalam menghasilkan kadar oksigen dalam suatu ruangan. *Prototype* ruangan dibuat dengan memasang sensor gas KE-50 untuk mendeteksi kadar oksigen serta pengaturan tegangan elektrolisis untuk melihat banyaknya kadar oksigen yang dapat dihasilkan.

II. METODOLOGI

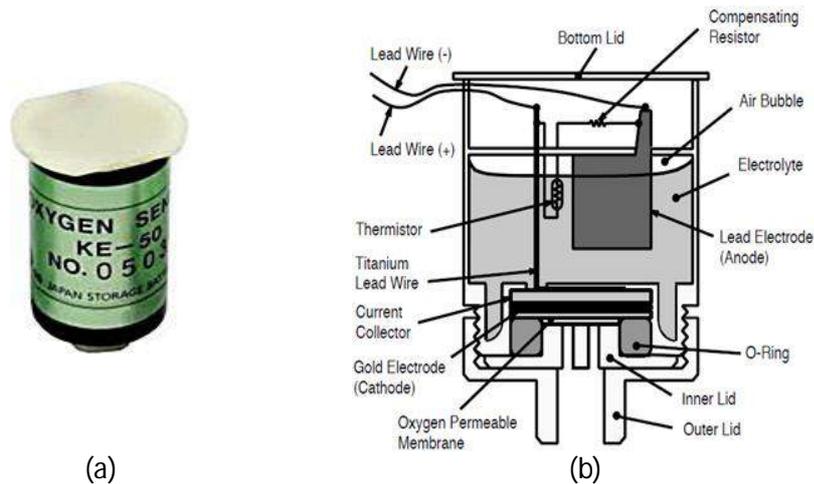
Diagram blok perancangan sistem secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 1. Sensor akan membaca kadar oksigen dalam ruangan setelah *power supply* dihubungkan ke listrik AC bertegangan 220V. *Power supply* ini digunakan sebagai sumber tegangan utama yang bekerja mengubah tegangan AC menjadi DC serta berfungsi sebagai trafo *step down*. sistem akan melakukan proses untuk mengontrol tegangan *electrolyzer*. Pengukuran oksigen dan nilai *setpoint input keypad* ditampilkan pada LCD.



Gambar 1. Blok diagram sistem

Penjelasan masing-masing blok adalah sebagai berikut :

- Keypad**
Berfungsi untuk memasukkan *setpoint* kadar oksigen yang ada pada ruang penampung. Nilai ini akan menjadi acuan bagi mikrokontroler untuk mengukur dan memutuskan tegangan untuk penyalan *electrolyzer*.
- Sensor oxygen KE-50**
Sensor gas digunakan sebagai pendeteksi kadar oksigen di dalam tabung. Sensor mendeteksi kadar oksigen di dalam ruangan secara terus menerus. Keluaran hasil pengukuran tersebut merupakan tegangan analog berbentuk tegangan. Sensor KE-50 merupakan sensor gas yang dapat digunakan untuk mendeteksi gas oksigen di dalam udara. Sensor ini ideal untuk mendeteksi perubahan kadar oksigen dan mempunyai sensitivitas yang tinggi pada oksigen. Sensor dapat dipergunakan dalam berbagai bidang seperti monitoring pembakaran gas, biokimia, aplikasi kesehatan, alat-alat perlengkapan rumah, dan sebagainya. Struktur sensor KE50 dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2.(a) Sensor KE-50 , (b) Struktur sensor KE50 (Figaro, 2005)

c. *Signal Conditioning*

Tegangan keluaran sensor merupakan tegangan yang kecil. Tegangan tersebut diperbesar menggunakan rangkaian penguat tegangan *non-inverting* agar dapat terbaca oleh ADC *internal* yang terdapat pada ATmega8535. Hasil penguatan tegangan tersebut akan sama polaritasnya dengan tegangan masuk.

d. Mikrokontroler ATmega8535

Berfungsi sebagai pemroses kadar O_2 yang telah diukur oleh sensor. Output data analog sensor akan diubah ke data digital oleh ADC yang telah terintegrasi di dalam mikrokontroler. Kadar gas akan diperintahkan oleh mikrokontroler untuk ditampilkan pada LCD. Untuk kebutuhan mikrokontroler ini digunakan *crystal external* sebesar 12 MHz serta rangkaian *reset* (Iswanto, 2003, Eko Putra, 2010).

e. Rangkaian *Driver* Tegangan

Merupakan rangkaian pengendali tegangan *electrolyzer* yang terdiri dari komponen MOC3041 dan TRIAC BT136. MOC3041 merupakan *optocoupler* satu arah yang digunakan sebagai pelindung dari tegangan tinggi agar tidak merusak komponen bertegangan rendah saat TRIAC BT136 mengalami kebocoran (Motorola, 1995). MOC3041 telah memiliki *zero crossing detector* untuk mendeteksi persilangan nol pada frekuensi tegangan AC. Titik nol tersebut merupakan acuan bagi TRIAC untuk memulai pengapian yang telah ditentukan besarnya dengan cara membuka dan menutup gate TRIAC dalam waktu *delay* tertentu maka proses pengaliran tegangan dilakukan.

f. *Electrolyzer*

Merupakan perangkat elektrolisis sebagai penghasil oksigen. Perangkat ini menggunakan tegangan listrik AC 220V dan mengkonversinya ke tegangan DC. Besar tegangan dari TRIAC akan mempengaruhi tegangan *electrolyzer* serta kecepatan reaksi kimia elektrolisis yang nantinya akan mempengaruhi besar oksigen yang dihasilkan.

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Pengujian Sensor Oksigen KE50

Pengujian sensor KE50 dilakukan dengan mengukur keluaran sensor secara langsung menggunakan multimeter. Dalam keadaan normal, tegangan sensor berkisar ± 47 mV. Nilai ini sesuai dengan penjelasan dari datasheet sensor dimana tegangan sensor dalam keadaan normal berkisar 47-67 mV. Selanjutnya sensor diletakkan pada wadah tertutup dan diberikan gangguan berupa asap pembakaran kertas. Hasil pengujian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengujian Tegangan Sensor dengan Asap

Waktu (menit)	Tegangan Sensor (mV)	
	Percobaan 1	Percobaan 2
0	47,8	44,8
1	42,8	39,6
2	37,6	35
3	36,6	34,6
4	36,4	34,6
5	36,6	34,5
6	38,7	34,5
7	38,8	34,3
8	39	34,3
9	39,2	34,4
10	39,2	34,3
Turun	11,4	10,5
Rata-rata	10,95	

Pemberian asap pada ruangan akan mengakibatkan tegangan sensor turun rata-rata sebesar 10,95 mV dalam selang waktu 10 menit seperti terlihat pada Tabel 1. Berkurangnya tegangan menjelaskan bahwa oksigen pada ruangan berkurang dengan diberikan asap. Pada percobaan pertama tegangan sensor turun dan kemudian terjadi lonjakan, sedangkan pada percobaan kedua tegangan turun dan tidak ada lonjakan. Perbedaan tersebut kemungkinan terjadi karena penutupan wadah yang kurang rapat, namun secara umum dapat disimpulkan sensor dalam keadaan baik.

3.2 Pengujian Rangkaian Pengkondisi Sinyal

Proses konversi tegangan sensor ke nilai kadar oksigen dilakukan dengan perbandingan range deteksi sensor dan jumlah bit ADC. ADC yang digunakan adalah ADC 10-bit yang merupakan ADC internal dari ATmega8535. ADC 10-bit memiliki kemungkinan data digital sebanyak 1024, sedangkan range deteksi sensor KE-50 dari 0 – 100% O₂ (0 – 1.000.000 ppm), sehingga diperoleh nilai 1 digital ADC sebesar $1.000.000 / 1024 = 976,56$ ppm. Hasil perhitungan ini selanjutnya akan dipakai dalam proses pengambilan data pengontrolan. Sebelum sinyal masuk ke mikrokontroler, sinyal dikuatkan dengan penguatan sebanyak 21,5 kali.

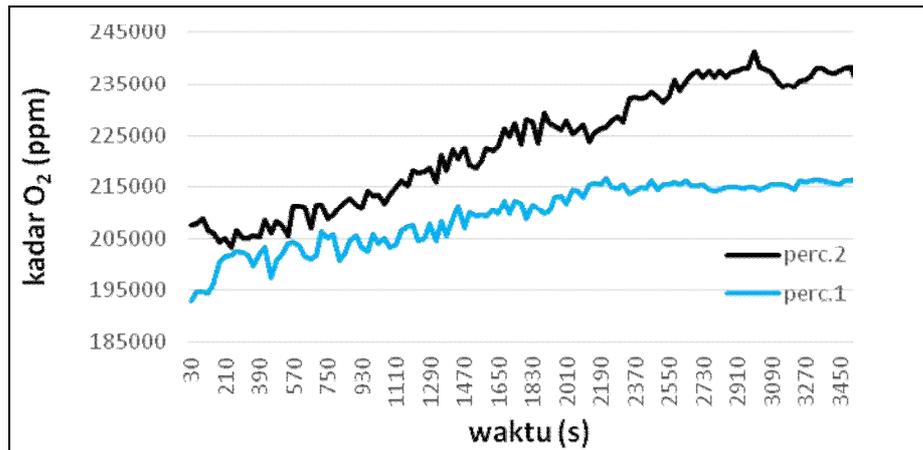
3.3 Pengujian Electrolyzer

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan alat elektrolisis dalam menghasilkan oksigen. Pada tahap ini dilakukan pengambilan data oksigen selama 60 menit dan pengambilan data setiap 30 detik. Sensor diletakkan pada wadah penampung oksigen melalui serial komputer dengan pengujian elektrolisis. Hasil gas dari elektrolisis dialirkan melalui selang ke wadah yang terdapat sensor.

3.3.1 Pengujian Elektrolisis Tanpa Asap

Elektrolisis dengan Daya Penuh

Pengujian awal dilakukan dengan menghubungkan *electrolyzer* ke tegangan AC220V secara langsung dengan daya penuh. Percobaan dilakukan 2 kali untuk memastikan hasil pengujian elektrolisis. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.

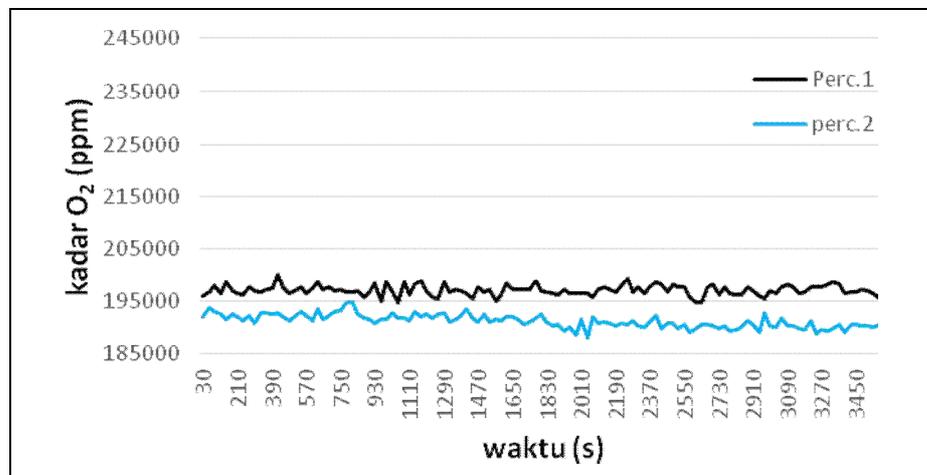


Gambar 3. Grafik pengaruh elektrolisis dengan daya penuh

Pada Gambar 3 terlihat kenaikan oksigen dengan adanya pengujian elektrolisis dengan daya penuh. Percobaan 1 dan 2 memiliki awal pembacaan yang berbeda walaupun sudah distabilkan karena akurasi pembacaan sensor yang masih memiliki *error* pembacaan. Percobaan 1 dapat menghasilkan oksigen sebesar 37,788 ppm, sedangkan pada percobaan 2 menghasilkan oksigen sebesar 24,197 ppm. Nilai tersebut menjelaskan bahwa proses elektrolisis dapat menghasilkan oksigen dengan adanya pemberian daya.

Elektrolisis dengan Daya Setengah

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui lebih lanjut pengaruh tegangan terhadap oksigen yang dihasilkan dari proses elektrolisis. Pengujian dilakukan dengan mengalirkan setengah daya dari kemampuan penuh alat elektrolisis. Untuk membagi tegangan tersebut maka digunakan PWM dengan *duty cycle* 50%. Program PWM tersebut disimpan dalam mikrokontroler untuk mengendalikan Optocoupler MOC3041 dalam penyulutan TRIAC. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik pengaruh elektrolisis dengan *duty cycle* 50% pada udara normal

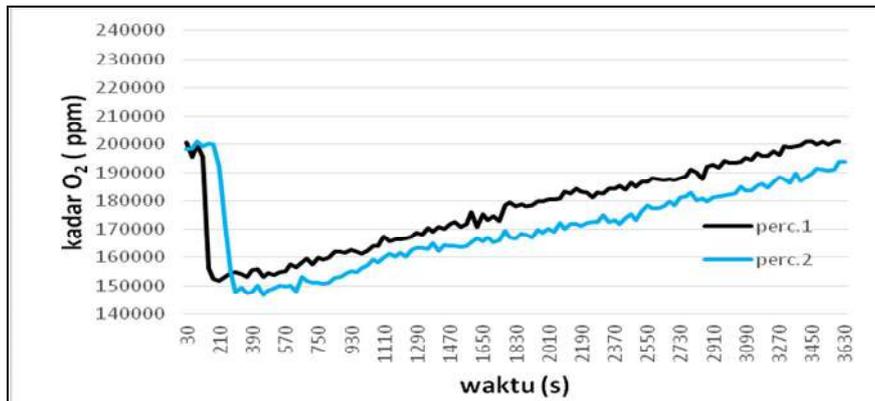
Pembatasan tegangan elektrolisis setengah dari tegangan penuh pada udara normal tidak terlalu memperlihatkan kenaikan oksigen pada ruangan. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4. Resolusi sensor yang cukup besar juga memberikan pengaruh pembacaan oksigen yang tidak teliti pada pengujian ini sehingga terlihat tidak ada kenaikan oksigen pada pengujian. Hasil pengujian diperoleh oksigen naik sebesar 5,276 ppm pada percobaan 1 dan 6,480 ppm pada percobaan 2 sehingga didapatkan nilai rata-rata dari kedua percobaan tersebut sebesar 5,878 ppm. Dari hasil percobaan dapat disimpulkan bahwa tegangan berpengaruh pada proses elektrolisis, semakin besar tegangan, semakin banyak oksigen yang dihasilkan.

3.3.2 Pengujian Elektrolisis dengan Pemberian Asap

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik alat penghasil oksigen dalam ruangan dengan pemberian asap sebagai gangguan. Pengujian ini dilakukan dengan membaca kadar oksigen terlebih dahulu, kemudian diberi asap pada ruangan dan dibiarkan selama 1,5 menit. Pengujian dilakukan dalam 3 kali percobaan dengan perlakuan yang sama pada setiap percobaan.

Elektrolisis Daya Penuh terhadap Asap

Pengujian ini dilakukan untuk melihat apakah hasil oksigen dari elektrolisis dapat menetralkan asap pada ruangan dan seberapa besar oksigen yang dihasilkan dalam rentang waktu 60 menit. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 5.

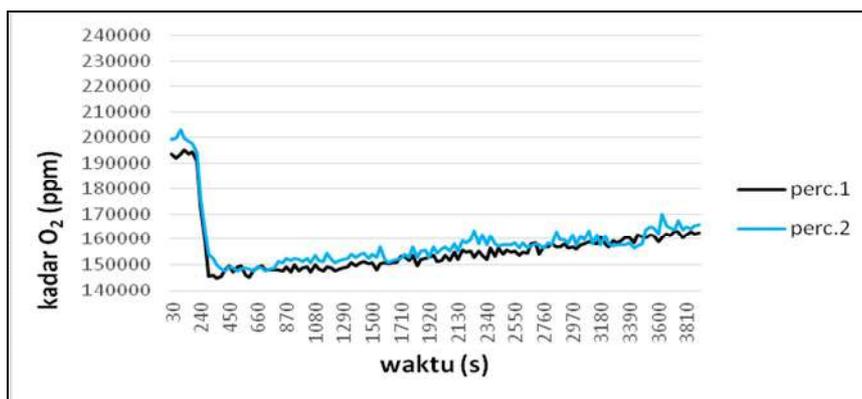


Gambar 5. Grafik pengaruh elektrolisis daya penuh terhadap asap

Pada Gambar 5 terlihat adanya pengaruh kenaikan oksigen dari proses elektrolisis terhadap ruangan berasap. Kadar oksigen pada ruangan berasap dapat dinormalkan kembali dengan adanya pengujian elektrolisis dalam waktu 60 menit. Oksigen yang dihasilkan sebesar 47,807 ppm pada percobaan pertama dan sebesar 47,222 pada percobaan kedua sehingga didapatkan nilai rata-rata sebesar 47,515 ppm dari keduanya.

Elektrolisis Daya Setengah terhadap Asap

Pengujian ini dilakukan untuk melihat hasil elektrolisis dengan mengalirkan setengah daya. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik pengaruh oksigen elektrolisis dengan *duty cycle* 50% pada asap

Gambar 6 menampilkan pengaruh elektrolisis dengan pengaliran tegangan setengah dari kemampuan maksimal alat. Hal tersebut menjelaskan adanya pengaruh variasi tegangan terhadap hasil elektrolisis. Hasil elektrolisis tidak begitu besar jika dibandingkan dengan kemampuan penuh pada pengasapan, hasil pada grafik memperlihatkan pencapaian tidak mencapai setengahnya. Alat hanya dapat menaikkan kadar oksigen sebesar 20,525 ppm.

IV. KESIMPULAN

Sensor Oksigen KE-50 pada alat telah berfungsi dengan baik dengan rata-rata tegangan dalam kondisi normal sekitar 47,5 mV dan mengalami penurunan tegangan sebesar rata-rata 10,95

mV dalam selang waktu 10 menit setelah ruangan diberikan asap. Tegangan yang diberikan berpengaruh pada proses elektrolisis. Jika diberikan daya penuh maka akan menghasilkan kadar oksigen yang lebih besar dibandingkan dengan daya setengah penuh. Elektrolisis dengan daya penuh mampu menetralkan kadar oksigen dalam ruangan dengan menghasilkan 47,515 ppm dalam selang waktu 60 menit setelah diberikan asap pada ruangan. Penggunaan daya setengah penuh hanya dapat menaikkan kadar oksigen sebesar 20,525 ppm.

DAFTAR PUSTAKA

- Eko Putra, Agfianto, dkk, 2010, Mudah Menguasai Pemrograman Mikrokontroler Atmel AVR menggunakan Bascom-AVR, ELINS UGM, Yogyakarta.
- Figaro, 2005, Technical Information for KE-Series, Figaro, Japan.
- Iswanto, 2003, Belajar Sendiri Mikrokontroler AT89S231 dengan BASIC Compiler, Andi, Yogyakarta.
- Motorola, 1995, Datasheet 6-Pin DIP Zero-Cross Optoisolators Triac Driver Output, Motorola, Arizona.
- Rezki, Nanda, Meqorry Yusfi, Dodon Yendri, 2012, Rancang Bangun Prototipe Pengurang Bahaya Gas Polutan dalam Ruangan dengan Metode Elektrolisis Berbasis Mikrokontroler, Jurusan Sistem Komputer, FTI UNAND.
- Sunarya Yayan, S Agus, 2007, Mudah dan Aktif Belajar Kimia, PT Grafindo Media Pratama, Bandung.

PEMODELAN KURVA I(V) *NORMAL LIGHT* DAN *DARK CURRENT* MODUL PV UNTUK MENENTUKAN UNJUK KERJA SOLAR SEL

Lazuardi Umar, Yanuar, Rahmondia N. Setiadi

Jurusan Fisika FMIPA Universitas Riau
Kampus Bina Widya, Jl. Prof. Dr. Muchtar Lutfi
Simpang Baru Pekanbaru 28293
email: lazuardi@unri.ac.id

ABSTRAK

Kemampuan kerja dari panel modul fotovoltaik (PV) umumnya ditentukan oleh banyak faktor seperti nilai tahanan internal. Nilai ini dapat menyatakan kondisi real dari modul PV dan dapat ditentukan mempergunakan kurva I(V) dari modul. Umumnya, kurva I(V) diukur pada dua kondisi berbeda yaitu pada kondisi *normal light* dan kondisi *dark current*. Pada penelitian ini diukur kurva I(V) dari modul PV Hooray MCP-2 yang umum terdapat di pasaran dengan nilai parameter – parameter modul fotovoltaik yaitu I_{sc} , V_{oc} , I_{pmax} dan V_{pmax} yang ditentukan berdasarkan persamaan Wagner, yaitu sebesar $M_1 = -6.992$ V/A untuk *normal light* dan $M_2 = -8.891$ V/A untuk kondisi *dark current*. Nilai arus dan tegangan maksimum diperoleh dari titik daya maksimum modul (*Maximum Power Point*, *MPP*). Hasil perhitungan tahanan internal seri pada modul fotovoltaik silikon polikristal Hooray diperoleh nilai sebesar 0.059Ω . Perubahan nilai ini menjadi indikator degradasi unjuk kerja fotovoltaik selama pengoperasian.

Kata kunci: Modul fotovoltaik, tahanan internal, *normal light*, *dark current*, gradien

ABSTRACT

*Photovoltaic modules (PV) performance is generally determined by many factors such as internal resistance value. This parameter shows the real condition of the PV module and can be determined using the I(V)-curve of the module. Generally, the curve I(V) is measured at two different conditions, namely in normal light and dark current. This paper presents the measured I(V) curve of the PV module Hooray MCP-2 commonly available in the market, with parameter values - namely photovoltaic module parameters I_{sc} , V_{oc} , I_{pmax} dan V_{pmax} which are determined after Wagner equation, $M_1 = -6.992$ V/A for normal light and $M_2 = -8.891$ V/A for dark current. The maximum voltage and current values are obtained from the maximum power point of PV module (*Maximum Power Point*, *MPP*). Simulation and calculation of the internal series resistance in the modules Hooray shows a value of 0.059Ω . Variation of this parameter can be used as indicators of photovoltaic performance degradation during operation.*

Keywords: Photovoltaic module, internal resistance, normal light, dark current, gradient

I. LATAR BELAKANG

Dewasa ini penggunaan energi listrik memberikan peranan yang sangat penting dalam kehidupan manusia yang membuat pekerjaan terasa lebih mudah dilakukan. Saat ini sumber energi yang bersumber dari minyak bumi kian hari persediaannya semakin menipis dan sulit diperoleh karena terbatas di dalam perut bumi, sedangkan energi matahari adalah sumber energi yang sangat besar yang dapat dimanfaatkan dan dikembangkan. Proses untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik dilakukan dengan menggunakan alat yang dinamakan sel surya (modul *photovoltaik*, PV) yang tersusun secara seri dan paralel dilapisi oleh bahan kedap air dan tahan terhadap perubahan cuaca (Gabor, 2010).

Berbagai tipe modul PV dibuat dan dijual di pasaran yang belum diketahui kualitas dan unjuk kerjanya (*performance*). Salah satu faktor penentuan harga adalah jumlah daya yang dihasilkan namun minim informasi yang menyatakan degradasi output panel selama pengoperasiannya. Salah satu cara untuk mengidentifikasi kualitas dari sel surya adalah dengan cara mengukur kurva I(V) nya dan menganalisa perubahan parameter penting yang mengakibatkan terjadinya depresiasi daya modul. Parameter penting dari modul PV yang sering menjadi acuan penurunan mutu panel surya adalah tahanan seri internal yang menggambarkan rugi-rugi internal (*internal losses*) akibat kontak listrik antar sel surya (Benghanem, 2008; Ouenoughi, 1999).

Perubahan tahanan seri internal ini akan terjadi seiring dengan waktu sehingga perlu diamati dalam periode operasi tertentu. Berbagai eksperimen telah dilakukan yang berkaitan dengan penentuan tahanan dalam pada modul PV telah dilakukan oleh (Wagner, 2000). Eksperimen yang dilakukan dengan mengukur tahanan internal dan daya maksimum pada Standar Test Conditions (STC). Kemudian, beberapa metode mempergunakan algoritma matematika dalam mengekstraksi

tahanan seri internal dari solar sel seperti dijelaskan pada (Radziemska, 2005; Araujo, 1982). Beberapa dari penelitian ini mengenalkan penggunaan metode pengukuran dinamis (Boucher, 1978) atau prosedur integrasi (Araujo 1982) berdasarkan perhitungan komputasi pada daerah di dalam kurva arus dan tegangan I(V).

Pada penelitian ini, modul PV *Silikon Polikristal Hooray MCP-2* telah dikarakterisasi untuk menentukan tahanan internalnya melalui pengukuran I(V). Untuk mengetahui tahanan seri internal dari modul telah dilakukan pengukuran kurva arus dan tegangan I(V) pada dua kondisi yaitu kondisi cahaya normal (*normal light*) dan kondisi tertutup screen (*dark current*). Dari pemodelan kedua kurva tersebut dan ekstraksi parameter maka akan diperoleh besarnya tahanan internal dari modul PV yang diuji. Berdasarkan penentuan tahanan internal ini maka dapat diketahui karakteristik dari komponen dari sistem fotovoltaik yang dapat dipergunakan untuk mengetahui degradasi output sel surya selama masa pengoperasiannya.

II. METODOLOGI

2.1 Pemodelan Kurva I(V) Solar Sel

Sifat listrik dari modul fotovoltaik biasanya diwakili dengan kurva I(V) yang terdiri dari tiga parameter yaitu tegangan dan arus maksimum (V_{mp} dan I_{mp}), tegangan *open circuit* (V_{oc}), arus *short circuit* (I_{sc}). Jika rangkaian PV diberi beban, maka akan menghasilkan beda potensial di antara terminal dari sel PV tersebut. Beda potensial menghasilkan arus yang berlawanan arah dengan arus foto (*photocurrent*) dan arus yang tersisa berkurang dari nilai rangkaian terbuka. Arus kebalikan ini disebut arus gelap (*dark current*), yang dianalogikan dengan arus I_{dark} .

Tahanan internal dapat diwakili dengan diagram rangkaian ekuivalen berisikan komponen fotoelektrik pengganti yang menyatakan tahanan positif dan negatif. Tahanan modul dinyatakan dalam R_{pv} dan berbeda dengan tahanan seri internal dari modul, R_s . Besar nilai karakteristik arus efektif dari sel PV adalah:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot e^{\left(\frac{v + I \cdot R_{pv}}{V_T}\right)} - 1 \quad (1)$$

dengan besar tegangan sel dinyatakan sebagai berikut,

$$V = V_T \ln\left(\frac{I_{ph} - I + I_0}{I_0}\right) - I \cdot R_{pv} \quad (2)$$

Parameter-parameter R_{pv} , V_T , I_0 , I_{ph} ditentukan dari hasil penentuan empat parameter lainnya, yang diperoleh dari pengukuran kurva I(V) yaitu I_{sc} , V_{oc} , I_{pmax} , V_{pmax} . Disamping empat parameter tersebut, ditentukan juga perubahan arus modul PV terhadap tegangan keluaran yang dinyatakan sebagai nilai kemiringan (*slope*) pada tegangan *open circuit* seperti berikut:

$$M = \frac{dV}{dI}(I = 0) \quad (3)$$

Dengan menggunakan sistem persamaan nonlinear simultan maka dapat ditentukan parameter R_{pv} , V_T , I_0 dan I_{ph} dari persamaan berikut:

$$R_{pv} = -M \frac{I_{sc}}{I_{pmax}} + \frac{V_{pmax}}{I_{pmax}} \left(1 - \frac{I_{sc}}{I_{pmax}}\right) \quad (4)$$

$$V_T = -(M + R_{pv}) \cdot I_{sc} \quad (5)$$

$$I_0 = I_{sc} \cdot \exp\left(\frac{-V_{oc}}{V_T}\right) \quad (6)$$

$$\text{dan } I_{ph} = I_{sc} \quad (7)$$

Besarnya perbedaan arus yang diperlukan untuk menentukan tahanan seri internal ditentukan sesuai persamaan: $\Delta I = 0.5 \cdot I_{sc}^2$, sehingga diperoleh tahanan internal modul fotovoltaik,

$$R_s = \frac{V(I_{sc2} - \Delta I, R_{pv2}, V_{T2}, I_{02}, I_{ph2}) - V(I_{sc1} - \Delta I, R_{pv1}, V_{T1}, I_{01}, I_{ph1})}{I_{sc1} - I_{sc2}} \quad (8)$$

Berdasarkan persamaan tersebut maka pemodelan kurva I(V) modul PV kondisi *normal light* dan *dark current* akan memberikan nilai tahanan internal dari modul fotovoltaik yang menjadi dasar penentuan kemampuan dari panel.

2.2 Eksperimen

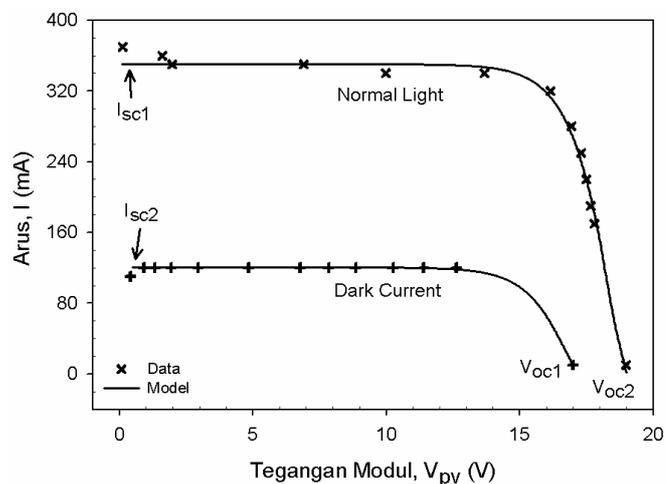
Pengukuran modul PV pada secara *normal light* dan dalam kondisi ditutup (*dark current*) dilakukan untuk memperoleh dua kurva I(V) sesuai dengan standar IEC60891. Pada penelitian ini pengukuran kondisi *dark current* dilaksanakan dengan menutup modul menggunakan layar (*screen*) dari bahan kawat nyamuk dengan tujuan untuk mengurangi intensitas radiasi yang jatuh pada modul PV. Adapun set up pengambilan data diperlihatkan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Set up percobaan untuk mengukur kurva I(V) modul fotovoltaik silikon polikristal Hooray MCP-2 dengan pemasangan *screen* pada permukaan modul

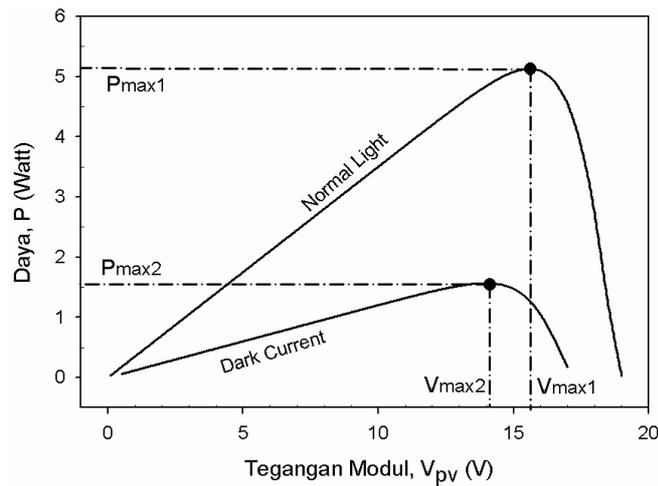
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kurva I(V) diperoleh dengan memvariasikan tahanan beban modul fotovoltaik pada kondisi *normal light* dan *dark current* seperti ditampilkan Gambar 2.



Gambar 2. Kurva I(V) modul fotovoltaik pada kondisi *normal light* dan *dark Current*

Parameter lainnya yang dapat diturunkan dari kurva I(V) adalah nilai maksimum modul fotovoltaik atau *Maximum Power Point* (MPP, yang menyatakan hubungan antara tegangan dan arus untuk menghasilkan daya maksimum. Besarnya MPP juga dapat dinyatakan sebagai daerah terluas dalam kurva I(V) (Araujo, 1982). Pada titik maksimum, modul fotovoltaik menghasilkan daya keluaran terbesar. Setelah melewati titik daya maksimum, maka daya keluaran akan mengalami penurunan, lihat pada Gambar 3..



Gambar 3. Kurva MPP modul fotovoltaik

Dari pemodelan kurva pada Gambar 2 dan 3 diperoleh parameter-parameter I_{sc} , V_{oc} , I_{pmax} dan V_{pmax} yang akan menentukan perhitungan nilai tahanan seri internal modul. Parameter-parameter tersebut disusun seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil ekstraksi pemodelan kurva I(V) modul PV

No	Kondisi Pencahayaan	Parameter Kurva I(V)			
		I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_{pmax} (A)	V_{pmax} (V)
1.	Normal Light	0.350	19	0.33	15.1
2.	Dark Current	0.12	17	0.11	14

Sementara nilai kemiringan (gradien) M kurva pada kondisi *normal light* dan *dark current* ditentukan berdasarkan persamaan (3). Untuk mempermudah perhitungan maka pada penelitian ini dipergunakan persamaan empiris berdasarkan Wagner (2000) yang dinyatakan sebagai berikut:

$$M = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \left(k_1 \frac{I_{pmax} \cdot V_{pmax}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} + k_2 \frac{V_{pmax}}{V_{oc}} + k_3 \frac{I_{pmax}}{I_{sc}} + k_4 \right) \quad (10)$$

dengan nilai konstanta $k_1 = -5.411$, $k_2 = 6.45$, $k_3 = 3.417$ dan $k_4 = -4.422$ yang berlaku untuk semua jenis modul fotovoltaik. Nilai gradient M untuk masing-masing kondisi adalah sebagai berikut:

$M_1 = -6.992$ V/A untuk *normal light* dan

$M_2 = -8.891$ V/A untuk kondisi *dark current*.

Nilai interval arus ditentukan dari nilai I_{sc2} dari Tabel 1 sehingga $\Delta I = 0.5 \cdot I_{sc2} = 0.06A$. Nilai V_1 dan V_2 untuk masing-masing kurva I(V) diberikan dari persamaan (2) dan dari parameter pada Tabel 2, Sehingga diperoleh nilai tahanan internal modul fotovoltaik sebesar:

$$R_s = \frac{V_2 - V_1}{I_{sc1} - I_{sc2}} = 0.059 \Omega$$

Nilai tahanan seri internal R_s ini menggambarkan rugi-rugi internal yang disebabkan oleh rugi-rugi kontak antar sel modul yang merupakan karakteristik dari modul. Perubahan nilai resistansi seri internal akan terjadi pada waktu yang lama yang akan menyebabkan depresiasi mutu keluaran dari modul seiring dengan waktu pemakaian sehingga akan mengurangi arus atau daya yang dihasilkan.

IV. KESIMPULAN

Modul silikon polikristal *Hooray MCP-2* telah dikarakterisasi untuk menentukan tahanan seri internal R_s berdasarkan pemodelan kurva arus dan tegangan I(V) pada dua kondisi berbeda yaitu

normal light dan *dark current*. Efek penurunan intensitas penyinaran pada kondisi *dark current* dilakukan dengan menutup mempergunakan *screen* yang menyebabkan penurunan intensitas daya iradiasi sebesar 30% dibandingkan kondisi normal. Berdasarkan pemodelan kurva I(V) diperoleh nilai nilai arus dan tegangan maksimum pada kondisi MPP adalah 331 mA dan 15.1V, sedangkan pada kondisi *dark current* diperoleh sebesar 112 mA dan 14 V. Berdasarkan data di atas diperoleh nilai tahanan seri internal R_s modul fotovoltaik silikon polikristal *Hooray MCP-2* sebesar 0.059 Ohm. Nilai ini sangat penting untuk mengetahui unjuk kerja sel surya dalam masa pengoperasian yang lama.

DAFTAR PUSTAKA

- Araujo G. L. and Sanchez E., 1982, A new method for experimental determination of the series resistance of a solar cell. *IEEE Trans Electron Dev*; 29:1511–3.
- Benghanem M. and Alamri S.N., 2008, Modeling of photovoltaic module and experimental determination of serial resistance, *Journal of Taibah University for Science*.
- Boucher J., Lescure M. and Vialas J., 1978, Determination of series resistance of a solar cell by dynamic methods, In: *Proc. 1st European community photovoltaic solar energy conference*, 1044.
- Gabor F., 2010, Measuring the difference in output power between fixed and rotatable PV arrays. *Knowbridge Conference on Renewables*.
- Ouenoughi Z. and Chegaar M., 1999, A simple method for extracting solar cell parameters using the conductance method, *Solid-State Electron*, vol. 43, 1985–1988.
- Radziemska E, 2005, Dark I–U–T measurements of single crystalline silicon solar cells. *Energy Conversion Manage*, vol. 46, 1485–1494.
- Wagner A., 2000, Peak – power and internal series resistance measurement under natural ambient conditions. *EuroSun Copenhagen*.

**PENENTUAN EFEKTIVITAS PENAHAN RADIASI DAN EVALUASI
DESAIN RUANG INSTALASI RADIOTERAPI RSUP DR. M DJAMIL
PADANG BERDASARKAN SAFETY REPORTS SERIES (SRS) IAEA NO.**

47

Dian Milvita¹, Imam Taufiq¹, Nunung Nuraeni², Helfi Yuliati², Suryawati Arifin¹

¹Jurusan Fisika FMIPA Universitas Andalas
Kampus Unand, Limau Manis, Padang, 25163
2PTKMR BATAN Jakarta
Email: *d_milvita@yahoo.com*

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian untuk menentukan efektivitas penahan radiasi dan evaluasi desain ruang Instalasi Radioterapi RSUP Dr. M. Djamil Padang berdasarkan *Safety Reports Series* (SRS) IAEA No. 47. Penentuan efektivitas dilakukan dengan cara menempelkan TLD-100 pada 8 titik pengukuran selama ± 1 bulan sedangkan evaluasi desain dilakukan dengan cara memeriksa kesesuaian desain ruang berdasarkan SRS IAEA No. 47. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai efektivitas penahan radiasi berkisar antara (98,76 - 99,98) % dan desain ruang Instalasi Radioterapi RSUD Dr. M. Djamil Padang telah memenuhi standar SRS IAEA No. 47.

Kata Kunci: efektivitas penahan radiasi, radioterapi, *safety reports series* (SRS) IAEA, TLD-100

ABSTRACT

The research to determine effectiveness of the radiation shield and evaluation design has been done in the installation radiotherapy Hospital Dr. M. Djamil Padang based Safety Reports Series (SRS) IAEA No. 47. Determination of the effectiveness conducted by gluing TLD-100 at 8 measurement points for 1 month, while the evaluation of the design is done by examining the suitability of the design room based SRS IAEA No. 47. The results showed that the radiation shield effectiveness ranged from (98.76 to 99.98)% and installation radiotherapy design Hospital Dr. M. Djamil Padang meets the standards of the IAEA SRS No. 47.

Keywords: effectiveness of the radiation shield, safety reports series (SRS) IAEA, TLD-100

I. PENDAHULUAN

Instalasi radioterapi adalah instalasi yang digunakan untuk kegiatan radioterapi. Radioterapi merupakan modalitas pengobatan menggunakan zat radioaktif terbungkus dan/atau pembangkit radiasi pengion (BAPETEN, 2013). Desain instalasi radioterapi harus dibangun berdasarkan *Safety Report Series* (SRS) IAEA No. 47 yang berjudul *Radiation Protection in The Design of Radiotherapy Facilities* (IAEA, 2006). Tujuan penelitian ini adalah menentukan efektivitas penahan radiasi dan evaluasi desain ruang Instalasi Radioterapi RSUP Dr. M. Djamil Padang berdasarkan SRS IAEA No. 47. Manfaat penelitian untuk meningkatkan keselamatan radiasi bagi pasien, pekerja, masyarakat dan lingkungan hidup di instalasi radioterapi (BAPETEN, 2013).

Penelitian tentang efektivitas penahan radiasi di daerah kerja telah dilakukan oleh Julita dkk (2007). Hasil yang diperoleh adalah, efektivitas penahan radiasi di instalasi radioterapi dari 13 titik pengukuran berkisar antara 11,4 % hingga 99,9 %. Perancangan ruangan radioterapi eksternal menggunakan sumber Co-60 telah dilakukan oleh Kristiyanti dkk (2012). Hasil penelitiannya menunjukkan, dinding ruang penyinaran radioterapi yang baik terbuat dari beton dengan tebal dinding primer 1300 mm dan panjangnya 500 mm serta tebal dinding sekunder 610 mm.

II. METODOLOGI

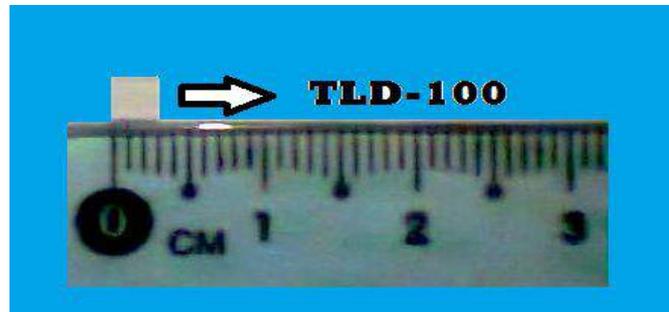
Penelitian dilakukan selama 1 bulan. Tempat pengambilan data dilakukan di Instalasi Radioterapi RSUP Dr. M. Djamil Padang dan tempat pembacaan data di PTKMR BATAN Jakarta. Penelitian menggunakan TLD-100 (Gambar 1) dengan sumber radiasi pesawat terapi Co-60 (Gambar 2). TLD-100 ditempelkan pada empat sisi dinding ruang penyinaran dan di balik dinding tersebut. Titik pengukuran tersebut berada di dalam ruang penyinaran yaitu titik no 1, 3, 5 dan 7, dan di luar ruang penyinaran yaitu titik 2, 4, 6 dan 8 (Gambar 3). Efektivitas diperoleh dari selisih kedua titik pengukuran, sebelum dan setelah melewati penahan radiasi, dengan persamaan

$$Efektivitas = \frac{\dot{D}_o - \dot{D}}{\dot{D}_o} \times 100\%$$

dengan,

\dot{D}_o = Laju dosis radiasi sebelum melewati penahan radiasi (mSv/tahun)

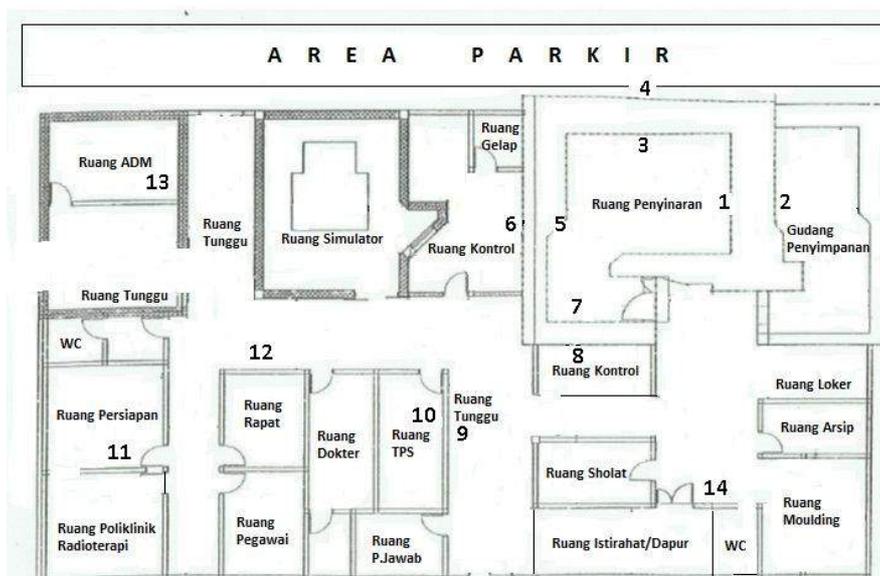
\dot{D} = Laju dosis radiasi setelah melewati penahan radiasi (mSv/tahun)



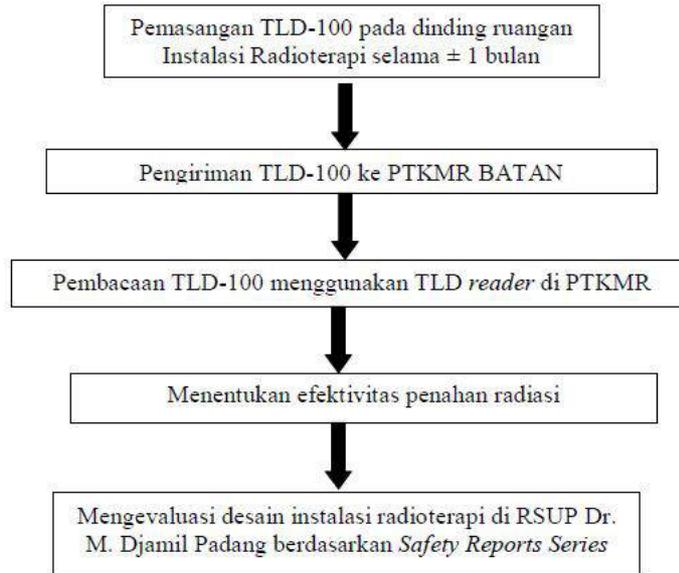
Gambar 1. TLD-100



Gambar 2. Pesawat Terapi Co-60



Gambar 3. Denah pemasangan TLD-100



Gambar 4. Diagram alir untuk menentukan efektivitas penahan radiasi dan evaluasi desain instalasi radioterapi

III. HASIL DAN DISKUSI

Tabel 1. Efektivitas penahan radiasi

No	Titik Pengukuran	Laju Dosis (mSv/tahun)		Efektivitas (%)
		Sebelum melewati penahan radiasi (D_o)	Setelah melewati penahan radiasi (D)	
1	1 dan 2	1.107,09	0,31	99,97
2	3 dan 4	1.839,26	0,33	99,98
3	5 dan 6	420,59	0,24	99,94
4	7 dan 8	36,53	0,46	98,74

Efektivitas penahan radiasi ditunjukkan pada Tabel 1. Nilai efektivitas penahan radiasi berkisar antara (98,74- 99,98) %. Efektivitas penahan radiasi pada penahan radiasi jenis beton sangat efektif sebagai pelindung radiasi karena dapat menyerap hampir 100 % dari dosis radiasi yang dipancarkan oleh sumber radiasi. Efektivitas penahan radiasi yang tinggi membuktikan ruang penyinaran radioterapi dapat digunakan di lingkungan tersebut. Pada penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya oleh Salmi Julita, dkk (2007) diperoleh efektivitas penahan radiasi dari 13 titik pengukuran berkisar antara 11,4 % hingga 99,9 %. Penelitian Julita, dkk dilakukan sebelum instalasi radioterapi direnovasi dan menggunakan instrumentasi lama. Instalasi direnovasi pada awal tahun 2012. Mulai beroperasi kembali pada 24 Juni 2013, menggunakan pesawat terapi Cobalt-60 yang memiliki aktivitas radiasi sebesar 396,9 TBq. Tabel 2. menunjukkan perbandingan nilai efektivitas penahan radiasi yang diperoleh Julita, dkk (2007).

Tabel 2. Perbandingan nilai efektivitas penahan radiasi

Julita, dkk (2007)			Milvita, dkk (2014)		
No	Titik Pengukuran	Efektivitas (%)	No	Titik Pengukuran	Efektivitas (%)
1	Kiri alat	99,9	1	1 dan 2	99,97
2	Depan alat	95,6	2	3 dan 4	99,98
3	Kanan alat	99,9	3	5 dan 6	99,94
4	Belakang alat	95,3	4	7 dan 8	98,74
5	Depan penahan radiasi	46			
6	Pintu (Timah hitam)	11,4			

Tabel 3. Evaluasi desain instalasi radioterapi

No	Fitur Desain Instalasi Radioterapi	<i>Safety Reports Series</i> No 47 IAEA	Evaluasi Desain Instalasi Radioterapi RSUP Dr. M. Djamil Padang	
			Ada	Tidak
1	Lokasi	Instalasi terletak di pinggir kompleks rumah sakit	√	
2	Akses	Akses masyarakat terbatas ke instalasi radioterapi	√	
3	Bahan pelindung (kontruksi bangunan)	Menggunakan beton	√	
3	Ukuran ruang penyinaran	Ruang penyinaran harus cukup luas untuk ekstensi penuh pesawat Co-60	√	
4	Labirin ruang penyinaran	Labirin dibuat dari pintu masuk hingga ruang penyinaran	√	
5	Pintu dan penghubung ruang penyinaran	Menggunakan timbal dan terhubung ke ruang kontrol	√	
6	Ruang kontrol	Memiliki akses ke ruang radioterapi	√	
7	Tanda peringatan bahaya radiasi	Dipasang di pintu masuk ruang penyinaran	√	
8	Pencahayaan ruangan	Ruang penyinaran harus redup, sehingga penyinaran dan kesejajaran laser dapat terlihat	√	

IV. KESIMPULAN

Nilai efektivitas penahan radiasi pada penahan radiasi ruang penyinaran berkisar antara (98,76- 99,98) %. Desain Instalasi Radioterapi RSUP Dr. M. Djamil Padang telah sesuai dengan *Safety Reports Series International Atomic Energy Agency (IAEA) No. 47*.

DAFTAR PUSTAKA

- BAPETEN, 2013, Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 3 Tahun 2013 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Radioterapi, Jakarta.
- IAEA. (2006), Radiation Protection in The Design of Radiotherapy Facilities, *Safety Reports Series* No. 47, Vienna.
- Julita, S., Milvita, D., Akhadi, M. dan Prasetio, H., (2007), Menentukan Efektifitas Penahan Radiasi Di Fasilitas Radioterapi Menggunakan Dosimeter Thermoluminesensi-100 (TLD-100), *Prosiding Seminar Nasional Fisika Universitas Andalas*, Jur. Fisika Unand, 123-131.
- Kristiyanti, Santoso, B., Jalil, A dan Sukandar, 2012, Perancangan Ruangan Radioterapi Eksternal Menggunakan Sumber Co-60, *Jurnal Perangkat Nuklir*, 6:2 , 95-101.
- Wurdiyanto, G. dan Trijiko, S., 2004, Kendali Kualitas dan Jaminan Kualitas Pesawat Radioterapi Bidikan Baru Laboratorium Metrologi Radiasi, *Buletin Alara*, 6:2, 101-105.

ANALISIS NEUTRONIK *LEAD-BISMUTH COOLED FAST REACTOR* (LFR) BERDASARKAN VARIASI DAYA KELUARAN

Cici Rahmadya Guskha¹, Mohammad Ali Shafii¹, Feriska Handayani Irka¹, Zaki Su'ud²

¹Jurusan Fisika Universitas Andalas

²Jurusan Fisika ITB

E-mail: *ciciguskha25@gmail.com*

ABSTRAK

Analisis neutronik *Lead-bismuth cooled Fast Reactor* (LFR) berdasarkan variasi daya keluaran telah dilakukan. Reaktor ini menggunakan UN-PuN (Uranium alam) sebagai bahan bakar dan timbal-bismuth sebagai pendingin. Parameter neutronik yang diamati meliputi faktor multiplikasi neutron (k_{eff}) dan analisis *burn up*. Penelitian ini dilakukan secara simulasi komputasi dengan menggunakan kode sistem SRAC dengan JENDL-32 sebagai *library*, dengan model teras *cylinder* dua dimensi R-Z dengan lima variasi daya keluaran. Teras reaktor dibagi menjadi 11 *region* radial dan 2 *region* axial. Sepuluh *region* pertama merupakan *region* untuk menempatkan bahan bakar sedangkan *region* ke sebelas adalah reflektor. Pada awal operasi reaktor, masing-masing *region* diisi dengan bahan bakar uranium alam. Setelah 10 tahun pembakaran, hasil *burn up* pada *region* ke-1 di *shuffling* ke *region* ke-2, hasil *burn up region* ke-2 di *shuffling* ke *region* ke-3, dan seterusnya sampai hasil *burn up region* ke-9 di *shuffling* ke *region* ke-10 dan hasil *burn up region* ke-10 dikeluarkan dari teras reaktor sehingga *region* ke-1 dapat diisi dengan bahan bakar baru (*fresh fuel*). Proses ini dilakukansampai 100 tahun operasi reaktor. Hasil simulasi menunjukkan bahwa daya 300 MWth mempunyai nilai faktor multiplikasi neutron, dan analisis *burn up* yang paling optimal dengan nilai k_{eff} per periode *burn up* mendekati nilai 1 (reaktor dalam keadaan kritis).

Kata kunci: LFR, UN-PuN, faktor multiplikasi (k_{eff}), *burn up*, *shuffling*.

ABSTRACT

The neutronic analysis of Lead-bismuth cooled Fast Reactor (LFR) based on the variations of power output has been done. This reactor uses Un-PuN (natural Uranium) as a fuel and lead-bismuth as a coolant. The observed neutronic parameter are covering factors multiplication of neutron (k_{eff}) and burn up analysis. This research is a simulated computing using the code SRAC with JENDL-32 as a library, with model of two dimensions R-Z core cylinder with five variation of power output. The reactor core is divided into eleven region radial and two region axial. Ten first region are the region for placing the fuel while the eleventh region are the reflector. At the beginning of the reactor operation, each region filled with natural uranium fuel. After 10 years of burning, the results of burn up in the region 1st is shuffling into region 2nd, the results of burn up of region 2nd is shuffling to region 3rd and so on until the results of burn up the region to 9th shuffling to region 10th and the results of burn up the region 10th removed from the reactor core so the region 1st can be filled with new fuel (fresh fuel). This process is performed up to 100 years of the operation of reactor. The simulation results show that the power of 300 MWth has the value factor multiplication of neutron and analysis burn up is most optimal with the k_{eff} per period burn up has been reached to the 1 (the reactor in the critical condition).

Keywords : LFR, UN-PuN, factors multiplication (k_{eff}), *burn up*, *shuffling*.

I. PENDAHULUAN

Analisis neutronik merupakan salah satu aspek yang perlu ditinjau dalam perancangan reaktor nuklir. Analisis neutronik membahas mengenai reaksi fisi yang terjadi di dalam elemen bahan bakar. Persoalan neutronik yang mendasar dalam teori reaktor nuklir adalah menentukan distribusi neutron dalam reaktor tersebut. Serangkaian perhitungan neutronik pada perancangan reaktor sangat diperlukan untuk mengetahui informasi seperti distribusi fluks dan distribusi daya.

Penelitian mengenai analisis neutronik pada reaktor cepat telah banyak dilakukan. Analisis neutronik pada reaktor cepat dengan variasi bahan pendingin (Na, Pb, dan Pb-Bi) telah dilakukan oleh Nurwinda (2009) dengan hasil penggunaan Pb-Bi pada reaktor cepat memberikan karakteristik neutronik yang paling optimal. Selain itu telah dilakukan juga oleh Cinatya (2014) tentang analisis neutronik pada reaktor cepat berpendingin Pb-Bi dengan variasi bahan bakar (UN-PuN, UC-PuC, dan MOX) yang menghasilkan penggunaan bahan bakar UN-PuN memiliki distribusi fluks neutron dan

distribusi daya yang paling besar serta juga memiliki karakteristik neutronik yang paling optimal dibandingkan dengan bahan yan lain. Hasil studi desain reaktor cepat berpendingin Pb-Bi berbasis bahan bakar uranium alam menggunakan strategi *shuffling* dilakukan oleh Rida (2006) dengan desain tinggi teras dan diameter teras aktif 250 cm dan 200 cm, pembagian teras 6 *region* yang menggunakan perbandingan fraksi bahan bakar, *cladding* dan *coolant* sebesar 51%, 14% dan 35% menghasilkan daya keluaran 1500 MWth. Untuk melengkapi informasi mengenai karakteristik *Lead-Bismuth Cooled Fast Reactor* (LFR) secara menyeluruh masih banyak aspek yang bisa ditinjau, dengan memvariaisikan daya keluaran reaktor.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis terhadap karakteristik neutronik yang meliputi faktor multiplikasi neutron, distribusi daya dan analisis *burn up* pada teras reaktor cepat LFR berdasarkan variasi daya keluaran. Analisis dilakukan untuk mengetahui daya keluaran dengan kinerja neutronik yang optimal sehingga dapat dilakukan pemilihan daya yang sesuai dengan kebutuhan optimum yang ingin dicapai.

II. METODE

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Komputasi Inti dan Atom, Jurusan Fisika, Universitas Andalas, Padang, dengan menggunakan kode program SRAC yang dikembangkan oleh JAEA (*Japan Atomic Energy Agency*). SRAC terdiri dari beberapa perpustakaan data nuklir yang diturunkan dari ENDF/B-IV (R2 dan R5), JENDL-3.1, JENDL-3.2, dan JEF-2.2. Versi yang telah dimodifikasi dari lima kode modul sudah terintegrasi dalam SRAC95; modul perhitungan probabilitas tumbukan (PIJ) untuk 16 tipe kisi geometri, modul perhitungan difusi (TUD, CITATION) dan dua kode pilihan untuk *assembly* bahan bakar dan perhitungan *burn up* teras (Okumura dkk, 2007).

Desain reaktor yang digunakan adalah reaktor cepat berpendingin timbal-bismuth dengan spektrum neutron cepat menggunakan strategi *shuffling* arah *radial*. Strategi ini diterapkan agar reaktor dapat beroperasi menggunakan bahan bakar uranium alam. Spesifikasi umum desain reaktor yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Spesifikasi umum desain reaktor

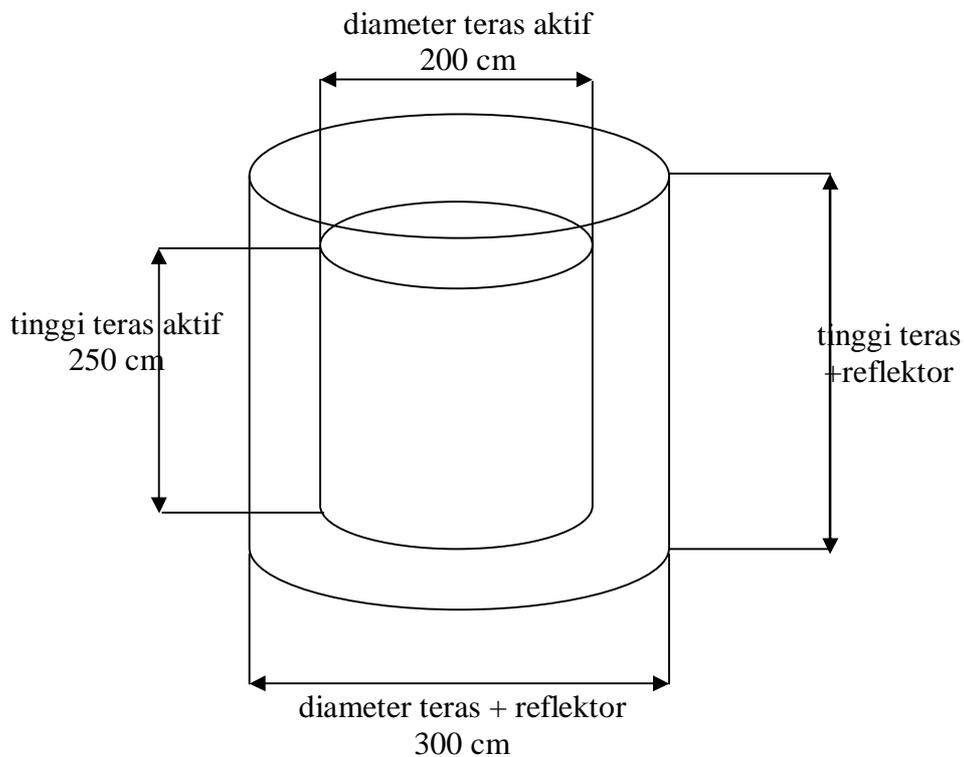
Parameter	Deskripsi
Geometri <i>cell</i>	<i>Cylinder</i>
Geometri teras	2-D <i>Cylinder</i>
Jumlah <i>region</i> bervolume sama dalam arah radial	10
Periode refueling	10
Bahan bakar (<i>fuel</i>)	UN dan PuN (uranium alam)
Struktur (<i>cladding</i>)	SS316
Pendingin (<i>coolant</i>)	Pb-Bi
Fraksi bahan bakar	51%
Fraksi struktur	35%
Fraksi pendingin	14%
Diameter Pin / <i>pitch</i>	1.4 cm
Tinggi teras aktif	2.5 m
Diameter teras aktif	2 m
Lebar reflector	50 cm

Analisis neutronik dilakukan dengan memvariasikan daya keluaran seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Variasi daya keluaran

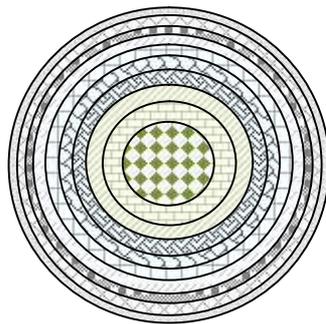
No	Variasi Daya Keluaran (MWth)
1	300
2	350
3	400
4	450
5	500

Desain teras yang digunakan pada penelitian ini bertipe cylinder 2-D dikarenakan, jika ditinjau dari faktor kebocoran neutron (*neutron leakage*) dan aliran *coolant* maka geometri silinder yang paling optimal. Geometri dan ukuran teras dapat dilihat pada Gambar 1.



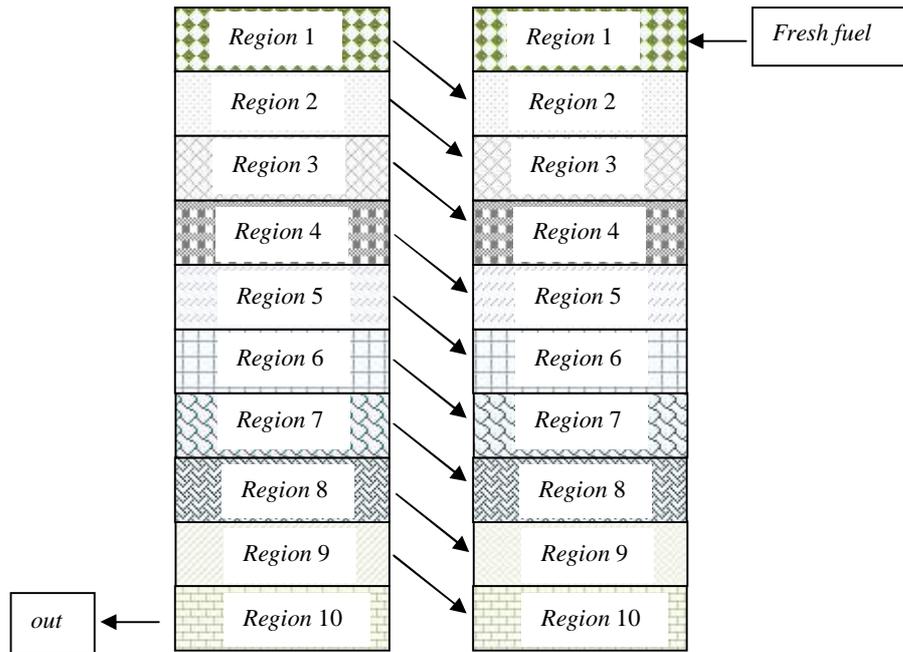
Gambar 1 Geometri dan ukuran teras

Secara umum teras dibagi menjadi 11 region radial dan 2 region axial. Sepuluh region pertama merupakan region untuk menempatkan bahan bakar sedangkan region ke sebelas adalah reflektor. Untuk pembagian secara axial, region pertama merupakan region untuk bahan bakar sedangkan region kedua untuk reflektor. Pembagian teras reaktor menjadi 10 *region* yang memiliki volume sama secara radial dapat digambarkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Penampang lintang konfigurasi teras reaktor dengan strategi *shuffling* arah radial.
(Irka, 2011)

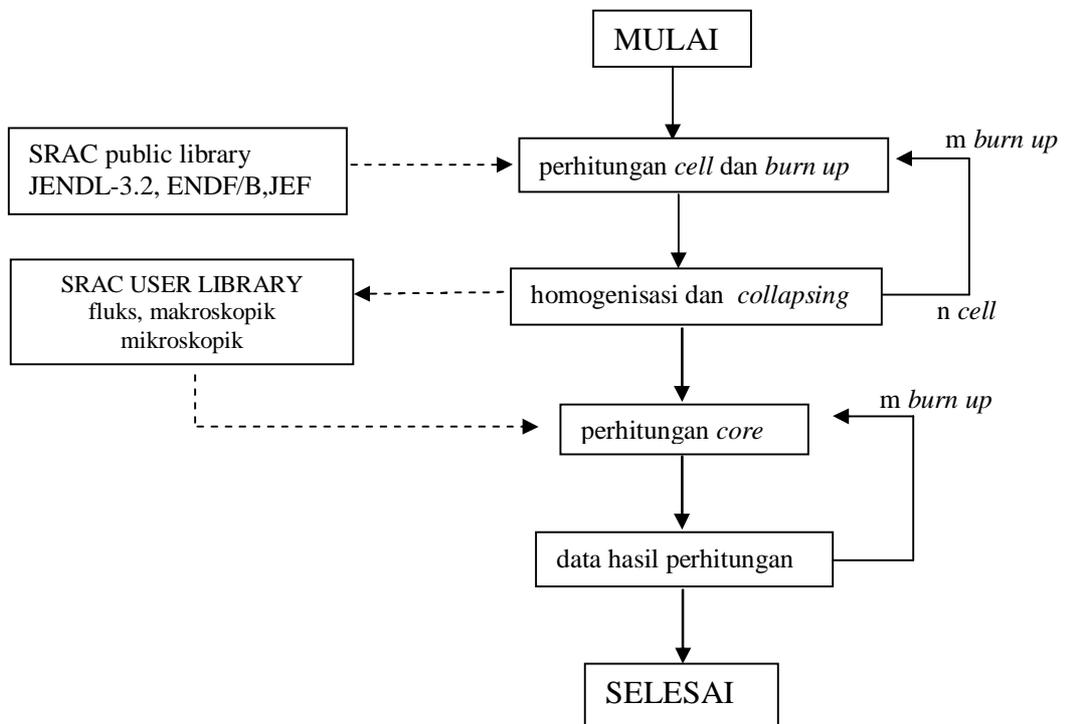
Sistem *shuffling* bahan bakar di 10 region teras reaktor setelah di *burn up* selama 100 tahun dapat digambarkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Sistem *shuffling* arah radial (Irka, 2011)

Teras reaktor dibagi menjadi 10 *region* yang memiliki volume yang sama secara radial. Mula-mula reaktor sepenuhnya diisi dengan bahan bakar uranium alam dan dipersiapkan untuk siklus teras yang pertama. Hasil *burn up* pada *region* 1 di *shuffling* ke *region* 2, hasil *burn up* *region* ke-2 di *shuffling* ke *region* 3, begitu seterusnya sampai hasil *burn up* *region* ke-9 di *shuffling* ke *region* 10 dan hasil *burn up* *region* ke-10 dikeluarkan dari teras reaktor sehingga *region* 1 dapat diisi dengan bahan bakar baru (*fresh fuel*). Begitu seterusnya sampai 100 tahun operasi reaktor.

Diagram blok perhitungan desain reaktor dengan SRAC dapat dilihat pada Gambar 4.

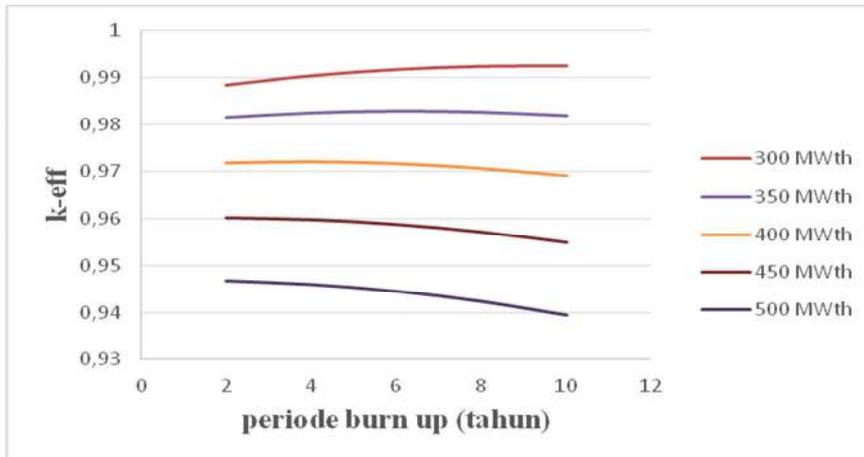


Gambar 4 Diagram blok perhitungan desain reaktor dengan SRAC.

III. HASIL DAN DISKUSI

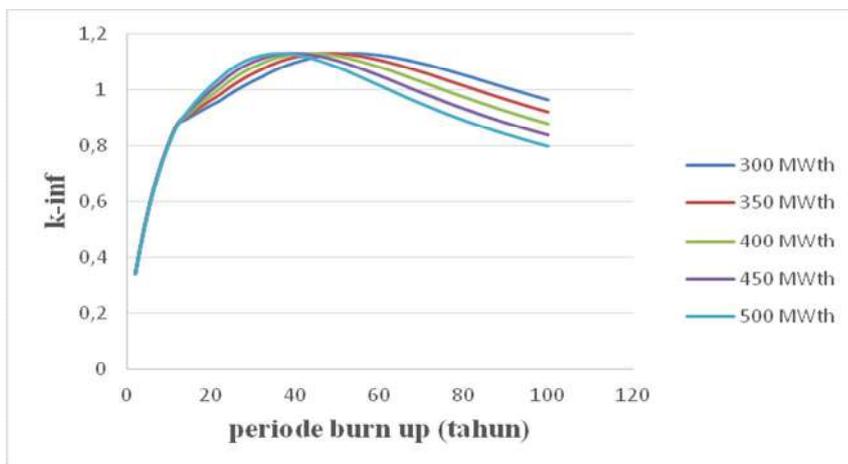
Dengan menggunakan metode perhitungan berdasarkan diagram alir pada Gambar 4 diperoleh nilai k_{eff} , k_{inf} dan level *burn up* yang menggambarkan kondisi neutron pada teras reaktor yang dirancang.

Nilai k_{eff} merupakan nilai perbandingan jumlah populasi neutron dalam teras reaktor pada satu generasi dengan generasi sebelumnya. Perbandingan k_{eff} untuk berbagai variasi daya keluaran dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Perbandingan k_{eff} untuk berbagai variasi daya keluaran

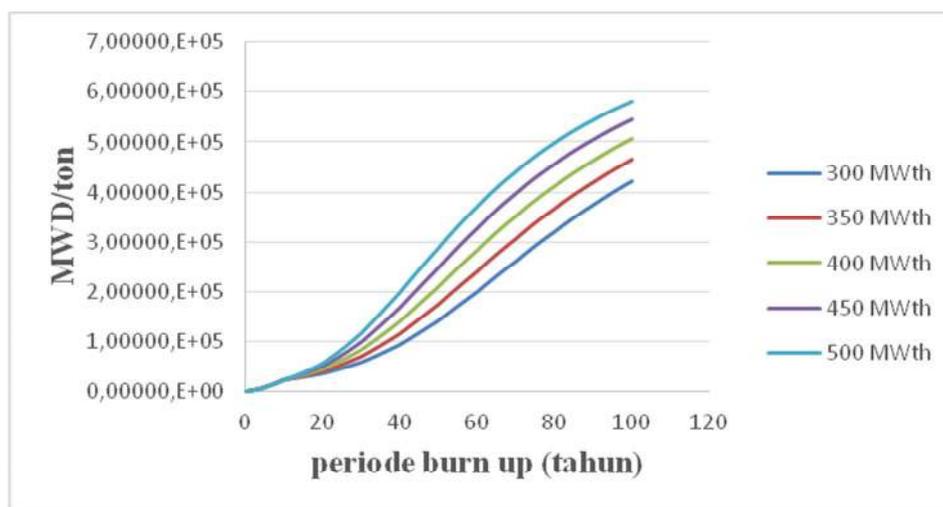
Dari Gambar 5 terlihat bahwa dengan naiknya daya keluaran nilai k_{eff} yang diperoleh semakin kecil. Dari semua daya keluaran yang diset terlihat bahwa reaktor dalam keadaan kritis pada daya keluaran 300 MWth terbukti dari nilai k_{eff} per periode *burn up* mendekati nilai 1



Gambar 6 Perbandingan k_{inf} untuk berbagai variasi daya keluaran

Gambar 6 merupakan hasil k_{inf} yang di dapatkan dari perhitungan sel, terlihat bahwa pada 20 tahun awal periode *burn up* pembakaran uranium alam menghasilkan nilai k_{inf} belum mencapai 1. Setelah lebih dari 20 tahun periode *burn up*, k_{inf} mengalami peningkatan secara bertahap mencapai nilai lebih dari 1. Hal ini dikarenakan pada awal periode *burn up*, bahan fisil yang ada di dalam teras reaktor kuantitasnya masih sedikit. Seiring dengan bertambahnya level *burn up*, bahan fertile ^{238}U telah menghasilkan bahan fisil ^{239}Pu , yang mengakibatkan populasi neutron meningkat dan nilai k_{inf} mencapai nilai 1.

Pada Gambar 7 di atas dapat dilihat bahwa level *burn up* sebanding dengan kenaikan daya keluaran reaktor. Semakin besar daya keluaran yang dihasilkan oleh reaktor maka jumlah bahan bakar yang di-*burn up*/ hari juga akan semakin besar. Hal ini dikarenakan untuk menghasilkan daya yang lebih besar membutuhkan jumlah neutron yang lebih banyak, begitu juga sebaliknya.



Gambar 7 Perbandingan level *burn up* untuk berbagai variasi daya keluaran

IV. KESIMPULAN

Analisis perhitungan neutronik pada LFR dengan bahan bakar uranium alam dan berpendingin timbal-bismuth untuk teras reaktor berukuran silinder arah R-Z menunjukkan bahwa daya 300 MWth merupakan hasil paling optimal dengan nilai k_{eff} per periode *burn up* telah mencapai nilai 1 (reaktor dalam keadaan kritis) kemudian dengan bertambahnya daya keluaran yang diinginkan pencapaian k_{inf} lebih dari satu membutuhkan periode *burn up* yang lebih lama. Selain itu dalam penelitian ini dapat ditunjukkan bahwa level *burn up* sebanding dengan kenaikan daya keluaran reaktor.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Fisika Nuklir Biofisika ITB yang telah memberikan izin menggunakan program SRAC.

DAFTAR PUSTAKA

- Cinantya N, D., 2014, Analisis Neutronik Pada Reaktor Cepat Dengan Variasi Bahan Bakar (UN-PuN, UC-PuC, dan MOX), *Skripsi*, Jurusan Fisika UNAND, Padang.
- Irka, F.H., 2011, Studi Desain Reaktor Cepat Berpendingin Gas Dengan Bahan Bakar Uranium Alam Menggunakan Strategi Shuffling Arah Radial, Tesis, ITB, Bandung.
- Nurwinda, 2009, Analisis Difusi Neutronik pada Reaktor Cepat dengan Variasi Bahan Pendingin (Na, Pb, Pb-Bi), *Skripsi*, Jurusan Fisika UNAND, Padang.
- Okumura, K., Kugo, T. dan Kaneko, K., 2007, *The Comprehensive Neutronics Calculation Code System*, JAERI.
- Rida, SNM., 2007, Design Study of Long Life Pb-Bi Cooled Reactors With Natural Uranium as Fuel Cycle Input Using Radial Fuel Shuffling Strategy, *International Conference on Advances in Nuclear Science and Engineering*

ANALISIS NEUTRONIK GAS COOLED FAST REACTOR (GCFR) MENGUNAKAN URANIUM ALAM DENGAN VARIASI SHUFFLING REGION ARAH RADIAL

Feriska Handayani Irka^{(1)*}, Zaki Su'ud⁽²⁾

⁽¹⁾Jurusan Fisika FMIPA Universitas Andalas, Padang

⁽²⁾Jurusan Fisika, FMIPA Institut Teknologi Bandung, Bandung

* Email: Feriska.irka@gmail.com

ABSTRAK

Analisis neutronik pada Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) menggunakan bahan bakar uranium alam dengan variasi shuffling region arah radial telah dilakukan. Teras reaktor dibagi menjadi 10 region dengan volume sama secara radial. Uranium alam yang akan digunakan untuk bahan bakar reaktor terlebih dahulu dibakar dalam jangka waktu tertentu sehingga menghasilkan bahan bakar fisiil yang dapat berfisi di dalam reaktor. Kemudian hasil burn up masing-masing tahun ditempatkan dalam teras reaktor dengan konfigurasi tertentu. Setelah 10 tahun periode burn up, bahan bakar dishuffling secara radial dari region 1 ke region 2, begitu seterusnya sampai bahan bakar region 9 dishuffling ke region 10 sehingga bahan bakar region 10 dikeluarkan dari teras reaktor dan bahan bakar baru ditempatkan di region 1. Variasi dilakukan dengan cara merubah konfigurasi posisi antar region. Variasi 1 dilakukan dengan memposisikan region 1 berdekatan dengan region 10 dan region 10 ditempatkan disebelah region 9, begitu seterusnya sehingga region 2 berada di bagian terluar teras reaktor. Variasi 2 dilakukan dengan menshuffling posisi region 10 dengan 9, sehingga region 1 berdekatan dengan region 9 berikutnya region 9 bersebelahan dengan region 10, begitu seterusnya sampai region 2 berada di bagian terluar teras reaktor. Beberapa variasi posisi shuffling bahan bakar dilakukan agar didapatkan konfigurasi yang menghasilkan performa neutronik optimal. Perhitungan dilakukan menggunakan sistem pengkodean SRAC dan JENDL-32 Library dengan model teras silinder 2D R-Z. Tinggi dan diameter teras aktif masing-masing 350 cm dan 240 cm. Fraksi volume yang digunakan 65% fuel, 10% cladding, 25% coolant; dengan daya keluaran 700 MWth. Analisis neutronik dan burn up reaktor menunjukkan konfigurasi yang menghasilkan performa yang baik adalah dengan menempatkan region 1 dan region akhir (region 10 atau region 9) secara berdekatan.

Kata kunci: GCFR, uranium alam, burn up, variasi shuffling

ABSTRACT

Neutronic analysis of gas cooled fast reactor (GCFR) uses natural uranium with shuffling of region variation radially has been conducted. The reactor core subdivided into 10 regions with the same volume in radial directions. Optimization evaluated by burning natural uranium for 100 years and put each of its burn up result per year in reactor with certain configuration. After 10 years burn up period, fuel from first region was shuffling radially to second region and so on until fuel from 9th region shuffling to 10th region, and then fuel from 10th was carried out from reactor core and fresh uranium input to the first region. The variation executed with changing position each region. First variation conducted with positioned first region near 10th region and 10th region placed beside 9th region and so on until second region placed outer from reactor core. Second variation done with positioned first region near 9th region and 9th region placed beside 10th region and so on until second region placed outer from reactor core. Several region shuffling variation in radial direction investigated to get best reactor performa. Calculation has been done by using SRAC system code with JENDL-32 as library, with cylindrical two dimensional R-Z core models. Shuffling method was used in order to make reactor can be operated using natural uranium. This natural uranium initially being burned by guessed power level of burn up. The height and diameter core are 350 cm and 240 cm respectively. The volume fraction for this design is 65% fuel, 10% cladding and 25% coolant; with output power 700 MWth. The results show that the reactor has been demonstrated on excellent performance if first region and last region (10th or 9th region) placed closely.

Keywords: GCFR, natural uranium, burn up, shuffling variation

I. PENDAHULUAN

Energi nuklir telah mengalami perkembangan ke arah yang lebih baik dari generasi ke generasi. Mulai dari generasi awal (generasi I) sampai sekarang sudah sampai ke generasi teranyar yaitu generasi IV. Keunggulan generasi IV dibandingkan generasi sebelumnya meliputi pengurangan

biaya pokok, keamanan nuklir yang dipertinggi, limbah nuklir yang diperkecil, dan pengurangan lebih lanjut dalam resiko pembuatan senjata (Driscoll and Heizler, 2005). Isu keamanan nuklir masih menjadi permasalahan utama berkaitan dengan pembangunan reaktor nuklir (Permana, dkk :2013). Salah satu usaha mengatasi persoalan ini adalah dengan memperkecil pengayaan bahan bakar nuklir atau bahkan dengan cara menggunakan bahan bakar tanpa pengayaan. Reaktor dapat beroperasi menggunakan bahan bakar uranium alam tanpa pengayaan yaitu dengan menerapkan spektrum neutron cepat yang disebut reaktor cepat. Salah satu jenis reaktor cepat yang sedang dikembangkan saat ini adalah *gas cooled fast reactor* (GCFR). Modifikasi sistem *burn up* bahan bakar di dalam teras reaktor GCFR agar dimungkinkan penggunaan uranium alam sebagai bahan bakar reaktor telah banyak dilakukan. Monado, dkk (2013) melakukan modifikasi *burn up* pada teras reaktor cepat berpendingin gas secara axial, dengan input uranium alam tanpa pengayaan. Penelitian ini menunjukkan reaktor yang dirancang menunjukkan performa yang baik dengan rata-rata *burn up* sekitar 25,9% HM. Rida (2008) melakukan studi desain reaktor cepat berpendingin Pb-Bi berbasis uranium alam menggunakan strategi *shuffling*, yang menghasilkan reaktor yang dirancang dapat beroperasi selama 90 tahun dengan periode *refueling* 15 tahun memberikan hasil yang baik untuk perbandingan fraksi bahan bakar, *cladding* dan *coolant* berturut-turut sebesar 51%, 14% dan 35%. Su'ud, dkk (2013) juga telah melakukan *shuffling* khusus bahan bakar secara radial pada reaktor cepat berpendingin Pb-Bi yang menghasilkan distribusi daya dan level *burn up* yang berbeda dengan penggunaan modifikasi teras menggunakan modifikasi CANDLE. Pada penelitian ini dilakukan analisis neutronik berupa penentuan k_{eff} , k_{inf} dan analisis *burn up* berupa rasio konversi U-238, densitas nuklida fisil dan fertil. Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan pada konfigurasi manakah reaktor bekerja dengan performa yang baik.

II. DESAIN TERAS

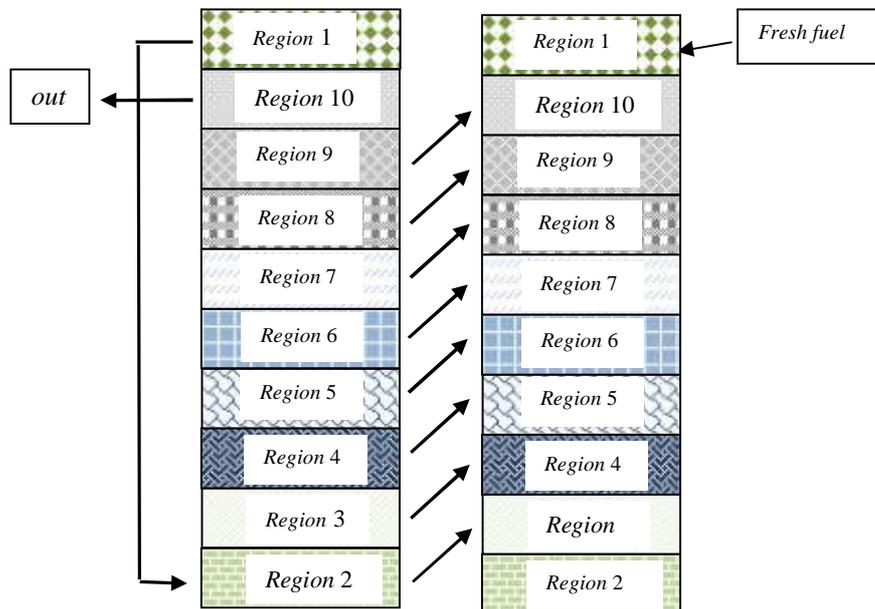
Spesifikasi umum desain reaktor yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 1 Spesifikasi umum desain reaktor

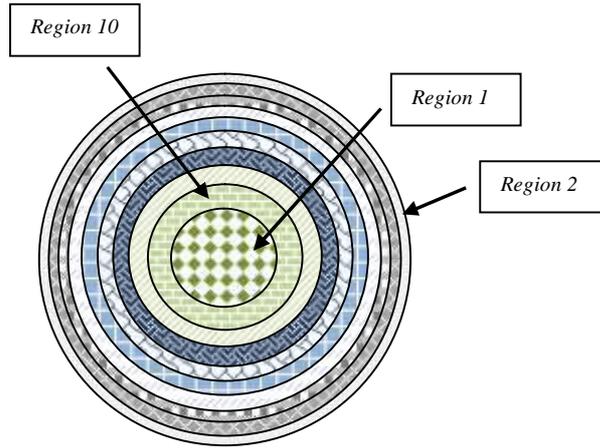
Parameter	Deskripsi
Daya (MWth)	700
Tipe pin cell	Cylinder cell
Geometri teras	2-D Cylinder
Periode refueling	10
Bahan bakar (<i>fuel</i>)	UN-PuN
Struktur (<i>cladding</i>)	SS316
Pendingin (<i>coolant</i>)	Helium
Diameter Pin /pitch	1,4 cm
Tinggi teras aktif	350 cm
Diameter teras aktif	240 cm

Uranium alam yang akan digunakan untuk bahan bakar reaktor terlebih dahulu *diburn* dalam jangka waktu tertentu sehingga menghasilkan bahan bakar fisil yang dapat berfisi di dalam reaktor. Kemudian hasil *burn up* masing-masing tahun ditempatkan dalam teras reaktor dengan konfigurasi tertentu. Teras reaktor dibagi menjadi 10 bagian yang memiliki volume sama secara radial. Setelah 10 tahun pembakaran, hasil *burn up* pada *region* 1 di *shuffling* ke *region* 2, hasil *burn up* *region* 2 di *shuffling* ke *region* 3, begitu seterusnya sampai hasil *burn up* *region* 9 di *shuffling* ke *region* 10 dan hasil *burn up* *region* 10 dikeluarkan dari teras reaktor sehingga *region* 1 dapat diisi dengan bahan bakar baru (*fresh fuel*) seperti terlihat pada gambar 1. Variasi *shuffling region* dilakukan untuk beberapa konfigurasi sebagai berikut:

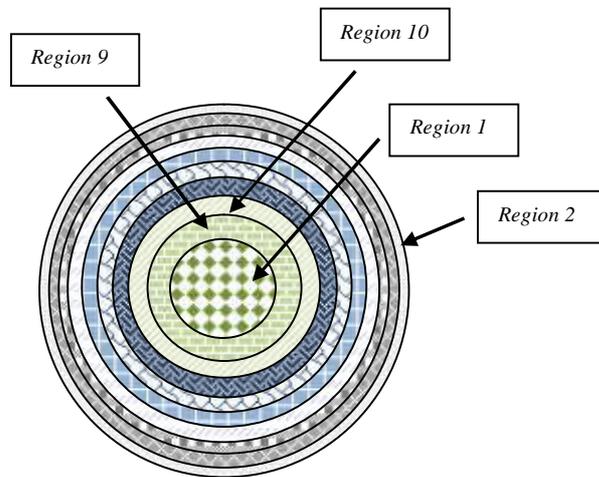
1. Variasi 1
Variasi 1 seperti terlihat pada gambar 2(a), dilakukan dengan memposisikan *region 1* berdekatan dengan *region 10* dan *region 10* ditempatkan disebelah *region 9*, begitu seterusnya sehingga *region 2* berada di bagian terluar teras reaktor.
1. Variasi 2
Variasi 2 seperti terlihat pada gambar 2(b), dilakukan dengan *shuffling* posisi *region 10* dengan 9, sehingga *region 1* berdekatan dengan *region 9* berikutnya *region 9* bersebelahan dengan *region 10*, begitu seterusnya sampai *region 2* berada di bagian terluar teras reaktor
2. Variasi 3
Variasi 3 seperti terlihat pada gambar 2(c), dilakukan dengan memposisikan *region 1* bersebelahan dengan *region 9*, *region 9* berdekatan dengan *region 8*, seterusnya sampai *region 7* bersebelahan dengan *region 6*, kemudian *region 6* bersebelahan dengan *region 10*, *region 10* bersebelahan dengan *region 5*, seterusnya sampai *region 2* berada di bagian terluar teras reaktor.
3. Variasi 4
Variasi 4 seperti terlihat pada gambar 2(d), dilakukan dengan memposisikan *region 1* bersebelahan dengan *region 10*, begitu seterusnya sampai *region 4* bersebelahan dengan *region 2* dan *region 2* bersebelahan dengan *region 3* yang merupakan bagian terluar dari teras reaktor.



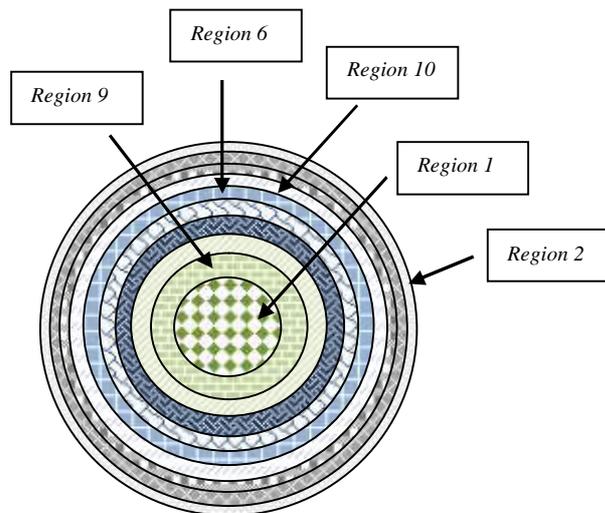
Gambar 1. Alur *shuffling* bahan bakar dalam teras reaktor secara radial



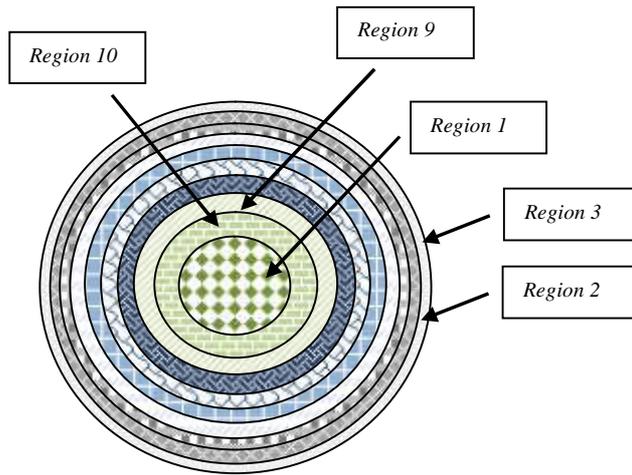
(a)



(b)



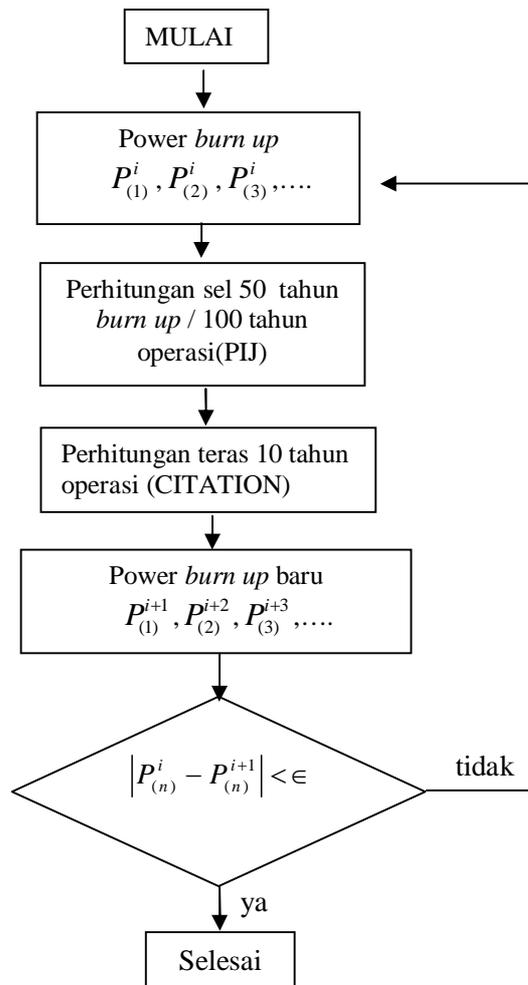
(c)



(d)

Gambar 2. Penampang lintang konfigurasi sistem *shuffling* arah radial (a). Variasi 1; (b). Variasi 2; (c) Variasi 3; (d). Variasi 4

III. METODOLOGI PENELITIAN



Gambar 3 Flowchart perhitungan.

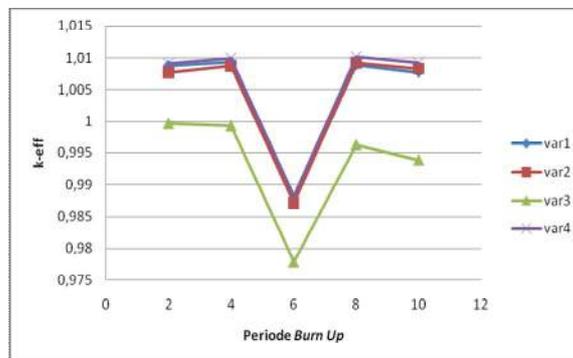
Perhitungan dan simulasi dalam penelitian ini menggunakan pemrograman SRAC yang dikembangkan oleh JAERI. Pada modul transport SRAC yang bernama PIJ dilakukan perhitungan homogenisasi sel dan mengerjakan perhitungan *burn up* sel. Rancangan awal untuk

modul PIJ ini dilakukan tebakan untuk 50 nilai *power level* (50 tahun periode *burn up* untuk 100 tahun operasi reaktor). Hasil yang didapatkan dari proses PIJ ini nantinya akan digunakan untuk perhitungan *core* (teras) reaktor pada modul CITATION, yang nantinya akan digunakan kembali pada modul PIJ. Secara keseluruhan proses perhitungan *burn up* diperlihatkan oleh gambar 3.

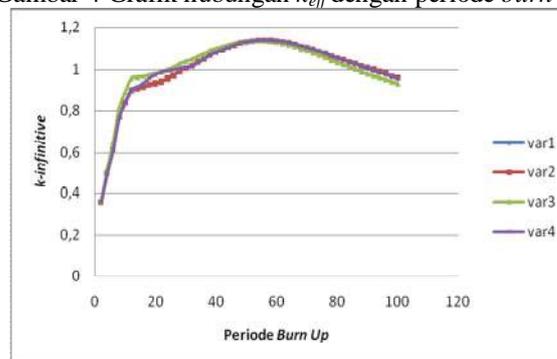
Dari perhitungan menggunakan sistem kode SRAC, didapatkan hasil untuk rancangan reaktor yang diinginkan. Perhitungan dilakukan dengan cara melakukan iterasi 10 kali sehingga data yang diperoleh konvergen dengan error $< 10^{-7}$.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dengan menggunakan metode perhitungan berdasarkan *flowchart* pada gambar 3 didapatkan nilai k_{eff} , k_{inf} dan parameter lainnya yang menggambarkan kondisi reaktor yang dirancang. Hasil ini dapat dilihat pada gambar 4-10. Dari gambar 4 terlihat bahwa nilai k_{eff} yang di hasilkan untuk semua variasi shuffling region berkisar mendekati nilai 1, hal ini menandakan reaktor yang dirancang berada dalam keadaan kritis. Pada gambar 5, untuk semua variasi shuffling region, terlihat nilai k_{inf} diawal periode *burn up* (10 tahun pertama) memiliki nilai kecil dari satu, hal ini disebabkan pada awal periode *burn up*, densitas bahan bakar fisil (Pu-239) masih kecil. Hal ini berdampak pada jumlah neutron yang dihasilkan di dalam teras reaktor dan menghasilkan nilai faktor multiplikasi di bawah satu.

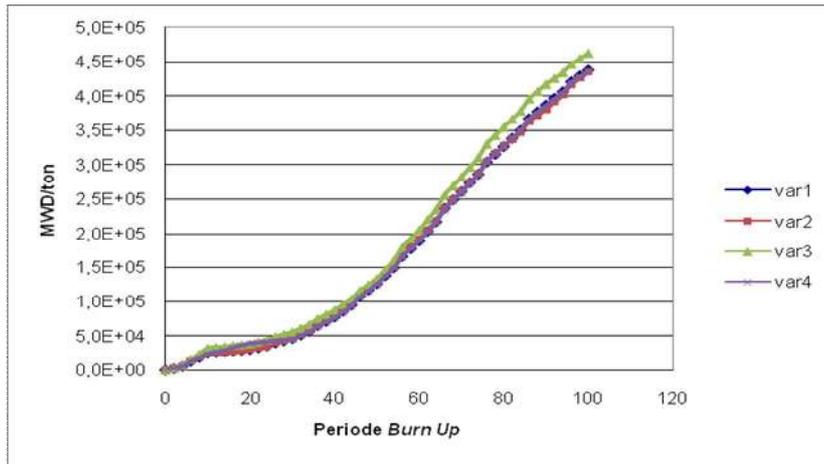


Gambar 4 Grafik hubungan k_{eff} dengan periode *burn up*

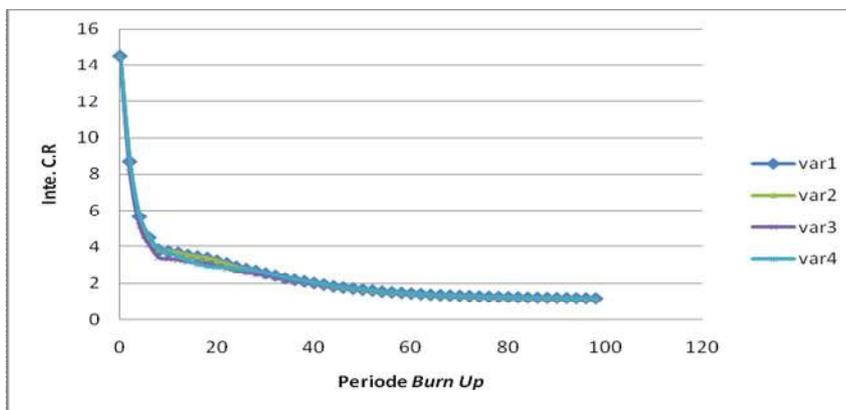


Gambar 5 Hubungan k_{inf} dengan periode *burn up*

Pada gambar 6 terlihat hubungan antara level *burn up* dengan periode *burn up* bahan bakar untuk semua variasi shuffling region. Level *burn up* sebanding dengan periode *burn up*, dengan naiknya periode *burn up* jumlah bahan bakar yang *diburn* semakin besar. Rasio konversi bahan fertil (U-238) menjadi bahan fisil (Pu-239) dapat dilihat pada gambar 7.

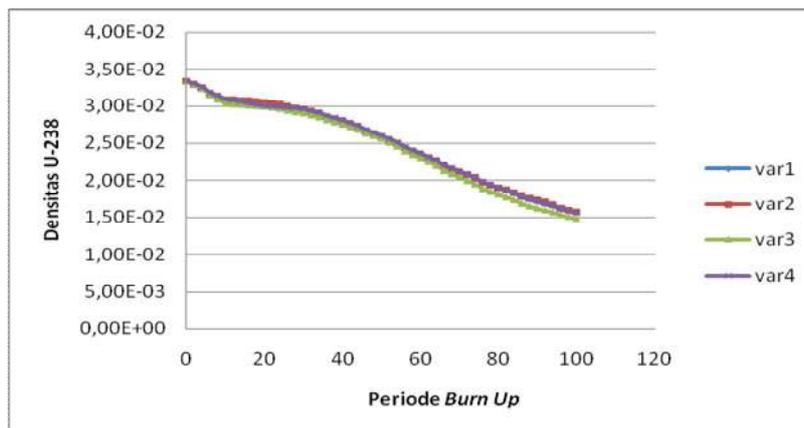


Gambar 6 Level burn up

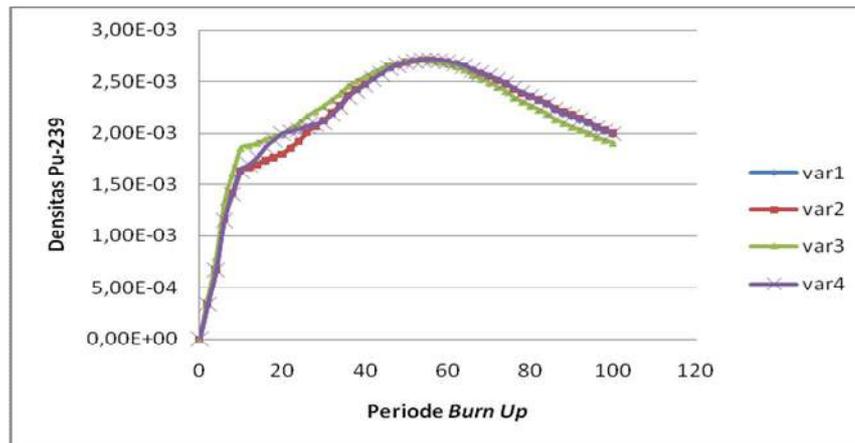


Gambar 7 Rasio konversi U-238 ke Pu-239

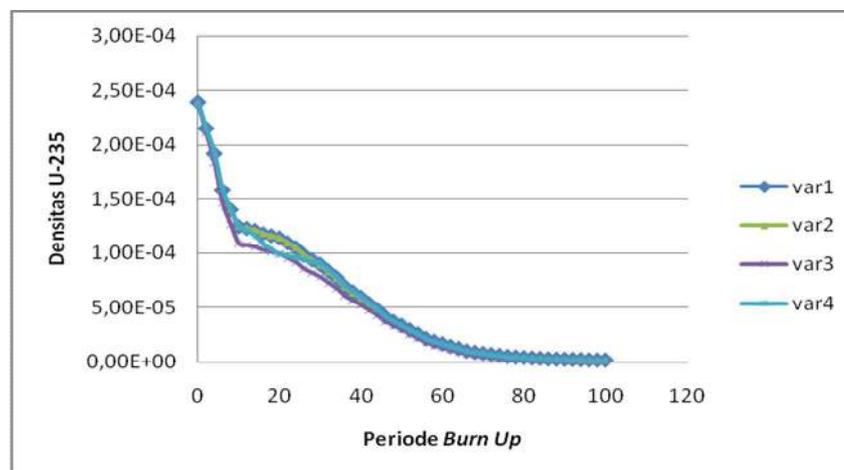
Analisis burn up bahan bakar untuk semua variasi *shuffling region* menunjukkan densitas U-238 dan U-235 semakin berkurang seiring dengan bertambahnya periode burn up seperti terlihat pada gambar 8 dan gambar 9. Sedangkan bahan fisil Pu-239 yang awalnya tidak ada menjadi bertambah dengan bertambahnya periode burn up seperti terlihat pada gambar 10.



Gambar 8 Densitas atom U-238



Gambar 10 Densitas atom Pu-239



Gambar 9 Densitas atom U-235

Dari gambar 4-10 terlihat variasi 1, variasi 2 dan variasi 4 memiliki pola yang hampir sama, sedangkan variasi 3 memiliki pola yang agak jauh berbeda dari tiga variasi lainnya. Ketiga variasi (1, 2 dan 4) dirancang dengan memposisikan *region* 1 yang berisi bahan bakar baru (*fresh fuel*) berdekatan dengan *region* 9 atau *region* 10, yang berisi bahan bakar yang telah di bakar selama 9 atau 10 kali periode *burn up*. Ketiga variasi memperlihatkan pola kerja reaktor yang optimal. Hal ini terlihat dari nilai k_{eff} dan nilai k_{inf} yang mencapai nilai 1, dan parameter-parameter lainnya yang menunjukkan reaktor bekerja dengan performa yang baik.

V. KESIMPULAN

Analisis neutronik GCFR telah dilakukan dengan menvariasikan konfigurasi *shuffling region* arah radial. Variasi *shuffling region* dilakukan untuk 4 konfigurasi. Keempat konfigurasi tersebut menunjukkan reaktor bekerja dalam keadaan baik, terlihat dari nilai k_{eff} yang mendekati nilai 1 (reaktor dalam kondisi kritis). Hal ini berarti reaktor dapat dioperasikan menggunakan uranium alam tanpa pengayaan. Tiga variasi memperlihatkan pola yang hampir sama dan menunjukkan kinerja optimal reaktor. Ketiga variasi ini dirancang dengan memposisikan *region* 1 yang berisi bahan bakar baru (*fresh fuel*) berdekatan dengan *region* 9 atau *region* 10, yang berisi bahan bakar yang telah diburn selama periode tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

- Driscoll, M. J. And P. Heizler, 2005, Reactor Physics Challenges in Gen IV Reactor Design, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 27 No. 1, Page 1 – 10
Monado, Fiber ; Zaki Su'ud; Abdul Waris; Khairul Basar; Menik Ariani; Hiroshi Sekimoto, 2013, Application of Modified CANDLE Burnup to Very Small Long Life Gas-cooled Fast

- Reactor, *Advanced Material Research Vol. 772* , Page 501-506. Trans Tech Publication, Switzerland
- Permana, Sidik; Novitrian; Abdul Waris, Zaki Su'ud, Ismail and Mitsutoshi Suzuki, 2013, Analysis on Even Mass Plutonium Production of Different Loading Materials in FBR Blanket, *Advanced Material Research Vol. 772* , Page 507-512. Trans Tech Publication, Switzerland
- Rida, SNM., 2007, Design Study of Long Life Pb-Bi Cooled Reactors With Natural Uranium as Fuel Cycle Input Using Radial Fuel *Shuffling* Strategy, International Conference on Advance in Nuclear Science and Engineering in Conjunction with LKSTN 2007, ITB, Page 257-261
- Su'ud, Zaki; Feriska H. Irka; Imam Taufiq; H Sekimoto; Sidik P, 2013, Desain Study of Pb-Bi Cooled Fast Reactors with Natural Uranium as Fuel Cycle Input Using Special Shuffling Strategy in Radial Direction, *Advanced Material Research Vol. 772* , Page 530-535. Trans Tech Publication, Switzerland

ANALISIS BIODISTRIBUSI Tc^{99m} PERTEKNETAT PADA KELENJAR TIROID DAN KELENJAR LUDAH PASIEN *STRUMA UNI NODOSA* DAN *STRUMA MULTI NODOSA*

Fandi Aulia Ilham¹, Dian Milvita¹, Fadil Nasir², Chavied Varuna³

1)Jurusan Fisika Universitas Andalas

2)PTKMR-BATAN Lebak Bulus Jakarta, Indonesia

3)Instalasi Kedokteran Nuklir RSPP Jakarta

E-mail: fandiaulia09@yahoo.com

ABSTRAK

Telah dilakukan analisis biodistribusi Tc^{99m} perteknetat pada kelenjar tiroid dan kelenjar ludah pasien *struma uni nodosa* dan *struma multi nodosa*. Data diperoleh dari 20 orang pasien *struma nodosa*, terdiri dari 10 pasien *struma uni nodosa* dan 10 pasien *struma multi nodosa*. Radioisotop disuntikkan ke dalam tubuh pasien melalui pembuluh darah *intravena*. *Scan* tiroid dilakukan menggunakan kamera gamma yang berjarak 10 cm dari tubuh pasien dengan tampilan *anterior*. Pemeriksaan dilakukan selama 5 menit setelah penyuntikan radioisotop. Hasil menunjukkan bahwa rerata biodistribusi Tc^{99m} perteknetat pada pasien *struma multi nodosa* lebih tinggi dari pada *struma uni nodosa*. Rerata biodistribusi pada *lobus* kanan lebih tinggi dari pada *lobus* kiri. Biodistribusi pada kelenjar ludah parotis lebih tinggi dari pada kelenjar ludah *submandibularis*. Dari hasil uji *wilcoxon* didapatkan hasil uji yang bermakna dengan hasil nilai probabilitas sebesar 0,016. Probabilitas H_0 (hipotesis awal) ini menunjukkan bahwa besarnya nilai hubungan antara hipotesis awal dengan hasil uji yang dilakukan, dengan hipotesis awal bentuk nodul mempengaruhi biodistribusi Tc^{99m} perteknetat, hal ini dikarenakan semakin banyak jumlah nodul maka radioisotop yang terdistribusi semakin kecil.

Kata kunci : biodistribusi, *struma uni nodosa*, *struma multi nodosa*, Tc^{99m} perteknetat

ABSTRACT

An analysis of biodistribution of Tc^{99m} perteknetate at thyroid gland and salivary gland *struma uni nodosa* and *struma multi nodosa* patients have been conducted. The data obtained from 20 *struma nodosa* patients, that consists of 10 *struma uni nodosa* and 10 *struma multi nodosa* patients. Radioisotope is injected into the patient's body through an intravenous blood vessels. Thyroid scanning is done using a gamma camera within 10 cm of the body of a patient with anterior view. Scanning is done for 5 minutes after injection of radioisotopes. The results showed that the average biodistribution perteknetate Tc^{99m} in *multi nodosa* patients higher than in the *uni struma nodosa*. Average biodistribution of right lobe is higher than left lobe. Average biodistribution in parotis salivary gland higher than in the *submandibularis* salivary gland. The results *wilcoxon* test meaningful test results with the results of the probability of 0,016. Probabilty H_0 (early hypothesis) indicates that the values of the relationship between the initial hypothesis with the results of the test performed. Where, the hypothesis of an early form of nodules affect biodistribution Tc^{99m} perteknetate. This is due to greater number of the radisotope distributed nodules smaller.

Keywords : bioditribution, *struma uni nodosa*, *struma multi nodosa*, Tc^{99m} perteknetate

I. PENDAHULUAN

Kedokteran nuklir merupakan salah satu spesialisasi ilmu kedokteran yang memanfaatkan sumber radiasi terbuka untuk penunjang diagnostik. Teknik kedokteran nuklir dilakukan secara *in vivo* yaitu radioisotop dimasukkan ke dalam tubuh pasien, atau dilakukan secara *in vitro* yaitu radioisotop direaksikan dengan bahan biologis antara lain darah, urin dan lainnya yang diambil dari tubuh pasien.

Pembesaran pada kelenjar tiroid disebut *struma nodosa* atau *struma*. Pembesaran pada tiroid yang disebabkan akibat adanya nodul, disebut *struma nodosa* (Tonacchera, dkk., 2009). Kelenjar tiroid dianggap membesar bila kelenjar tersebut lebih dari 2 kali ukuran normal. Setiap orang berisiko 5 hingga 10% untuk menderita *struma nodosa* dan perempuan berisiko 4 kali lipat dibanding laki-laki (Incidence and Prevalence Data, 2012). Tc^{99m} merupakan suatu radiofarmaka buatan yang paling banyak digunakan untuk tujuan penunjang diagnosis di kedokteran nuklir. Hal ini disebabkan Tc^{99m} memiliki waktu paro yang pendek yaitu 6 jam, dengan energi foton yang rendah yaitu 140 KeV. Tc^{99m} perteknetat adalah salah satu radiofarmaka teknesium yang digunakan dalam pencitraan organ kelenjar tiroid (Sharp dan Gemmel, 2005).

Pemeriksaan kelenjar tiroid merupakan pemeriksaan tiroid dengan kamera gamma menggunakan radiofarmaka yang diinjeksikan ke dalam tubuh pasien melalui pembuluh darah *intravena*. Radiofarmaka yang sering digunakan adalah Tc^{99m} perteknetat. Tubuh manusia memiliki kekhasan dalam penyerapan suatu zat ke dalam organ tubuh tertentu. Dengan kekhasan sifatnya, maka zat tersebut akan terserap ke organ tertentu sambil terus memancarkan radionuklida. Pancaran inilah yang ditangkap dengan menggunakan kamera gamma.

Pada penelitian ini dilakukan penentuan biodistribusi Tc^{99m} perteknetat pada kelenjar tiroid dan kelenjar ludah pasien *struma uni nodosa* dan *struma multi nodosa*, dengan 10 pasien *struma uni nodosa* dan 10 pasien *struma multi nodosa*. Biodistribusi dilihat dengan target kelenjar tiroid dan kelenjar ludah untuk mengetahui besarnya biodistribusi (sebaran) aktivitas radiasi di kelenjar tersebut. Penelitian ini penting dilakukan untuk memudahkan dokter dalam mendiagnosis kelainan pada kelenjar tiroid dan kelenjar ludah pada pasien *struma uni nodosa* dan *struma multi nodosa*, serta dapat menjadi acuan dokter dalam mendiagnosis penyakit.

II. METODOLOGI

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan selama ± 8 bulan. Pengambilan data dilakukan selama ± 1 bulan di Instalasi Kedokteran Nuklir Rumah Sakit Pusat Pertamina Jakarta mulai tanggal 6 Januari 2015 s/d 8 Februari 2015. Pengolahan data dilakukan di laboratorium Fisika Atom dan Inti Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Andalas Padang.

2.2 Bahan dan Alat Penelitian

Bahan penelitian yang digunakan adalah Tc^{99m} perteknetat merupakan radioisotop yang diinjeksikan ke dalam tubuh pasien yang menjalani scan tiroid. Alat yang digunakan adalah Kamera gamma dual head skylight ADAC merk Philips merupakan alat pencitraan organ tubuh yang dilengkapi dengan detektor yang menangkap pancaran sinar gamma dari radiofarmaka dalam tubuh pasien. Komputer merk Pegasys Sunblade 150 digunakan untuk menentukan biodistribusi, background (cacahan latar) dengan teknik ROI (*Region of Interest*). *Dose calibrator* tipe Capintec merupakan alat untuk menghitung aktivitas dari suatu sumber radioisotop.

2.3 Tata cara pemeriksaan kelenjar tiroid

Persiapan awal pasien dengan identifikasi nama pasien, jenis kelamin dan umur. Radioisotop yang digunakan dalam pemeriksaan tiroid yaitu Tc^{99m} perteknetat dengan aktivitas sebesar (3-5) mCi. Aktivitas radioisotop diukur menggunakan *dose calibrator*, dilakukan pengukuran aktivitas radiofarmaka. Radioisotop Tc^{99m} perteknetat sebanyak 1 mCi dicacah di bawah kamera gamma dengan jarak 10 cm sebagai kalibrasi cacahan awal. Radioisotop disuntikkan ke dalam tubuh pasien melalui pembuluh darah intravena di daerah kubiti (lipatan tangan). Pasien diberikan waktu ± 5 menit sebelum pasien menjalani pemeriksaan tiroid. *Scan tiroid* dilakukan menggunakan kamera gamma yang berjarak 10 cm dari tubuh pasien dengan tampilan *anterior*. Pemeriksaan dilakukan selama 5 menit setelah penyuntikan radioisotop.

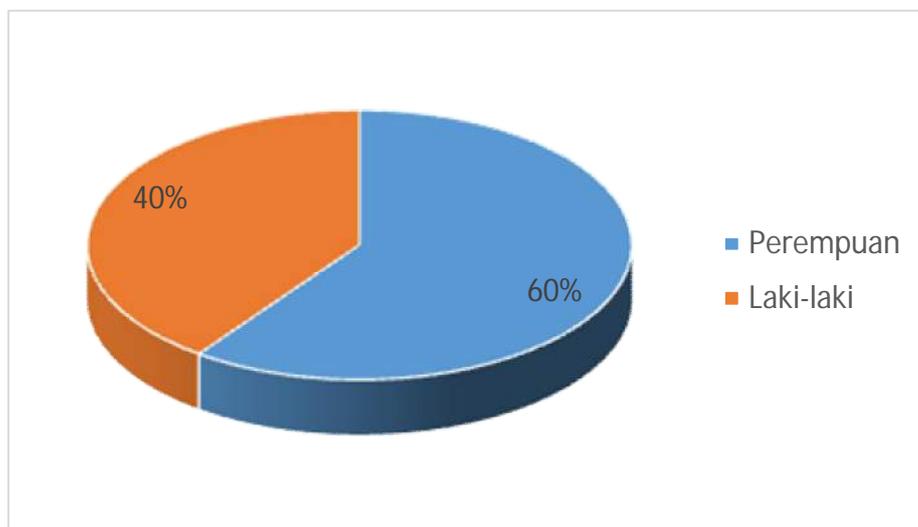
III. HASIL DAN DISKUSI

Dari hasil pemeriksaan yang dilakukan di Rumah Sakit Pusat Pertamina (RSPP) Jakarta pada 20 pasien *struma nodosa* yang terdiri dari 10 pasien *struma uni nodosa* dan 10 pasien *struma multi nodosa*, diperoleh data pasien yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Pada Tabel 1 menunjukkan usia pasien berkisar antara (24 – 70) tahun, dari data tersebut tidak ditemukan pasien yang berusia anak-anak. *Struma uni nodosa* dan *struma multi nodosa* jarang ditemukan pada anak-anak dikarenakan ganasnya nodul meningkat secara linier dengan bertambahnya usia. Berdasarkan Gambar 1, pasien *struma uni nodosa* dan *struma multi nodosa* lebih banyak ditemukan pada perempuan dibandingkan laki-laki. Hal ini sesuai dengan literatur, dimana frekuensi penderita nodul tiroid pada perempuan berkisar antara 2 hingga 4 kali lebih besar dari pada laki-laki (Syahfreadi, 2008).

Tabel 1 Data pasien struma uni nodosa dan struma multi nodosa

No	Inisial Pasien	Jenis Kelamin (P/L)	Jenis Struma Nodosa	Usia (tahun)	Dosis Injeksi (mCi)	Dosis Injeksi (MBq)
1	TT	P	Uni Nodosa	57	4,78	176,86
2	RJ	L	Uni Nodosa	55	4,65	172,05
3	WS	L	Uni Nodosa	28	3,26	120,62
4	WK	P	Uni Nodosa	31	3,49	129,13
5	DS	P	Uni Nodosa	57	4,78	176,86
6	CR	P	Uni Nodosa	25	3,12	115,44
7	ST	P	Uni Nodosa	61	4,83	178,71
8	DT	P	Uni Nodosa	47	4,09	151,33
9	OI	L	Uni Nodosa	47	4,09	151,33
10	YR	L	Uni Nodosa	49	4,36	161,32
11	LT	P	Multi Nodosa	52	4,56	168,72
12	RD	L	Multi Nodosa	24	3,03	112,11
13	WN	P	Multi Nodosa	65	4,86	179,82
14	SR	L	Multi Nodosa	26	3,19	118,03
15	DF	P	Multi Nodosa	31	3,49	129,13
16	NK	P	Multi Nodosa	45	3,98	147,26
17	BF	L	Multi Nodosa	36	3,87	143,19
18	SK	P	Multi Nodosa	36	3,87	143,19
19	BW	L	Multi Nodosa	70	4,98	184,26
20	IL	P	Multi Nodosa	51	4,51	166,87
Rata-rata					4,09	151,33
Minimum				24	3,03	112,11
Maksimum				70	4,98	184,26
Dosis Injeksi Maksimum oleh IAEA					5,00	185,00



Gambar 1 Persentase jumlah pasien perempuan dan laki-laki

Pada penelitian ini, pemberian dosis injeksi dari Tc^{99m} perteknetat pada pasien dicacah menggunakan *dose calibrator*. Sebelum dilakukan injeksi, dosis radioisotop dihitung kembali di bawah detektor kamera gamma dan diperoleh rerata aktivitas dosis pada Tabel 1 sebesar 4,09 mCi. Menurut IAEA (2005) (International Atomic Energy Agency), aktivitas maksimum yang diperbolehkan dalam melakukan *scan* tiroid adalah sebesar 5 mCi. Pemberian dosis injeksi pada masing-masing pasien berbeda-beda, dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya usia pasien, ketersediaan radioisotop serta kondisi pasien saat pemeriksaan diagnosis kiriman dokter.

Pengaruh usia pasien, apabila nodul terjadi pada usia di bawah 20 tahun atau di atas 50 tahun mempunyai resiko ganas atau menjadi kanker lebih tinggi, hal ini yang mempengaruhi pemberian

dosis radiasi pada masing-masing pasien. Semakin tua usia pasien dosis yang diberikan semakin tinggi. Ketersediaan radioisotop juga mempengaruhi pemberian dosis radiasi karena tidak semua elusi radioisotop yang dapat digunakan dalam satu hari karena waktu paro dari radioisotop Tc^{99m} yang singkat yaitu 6 jam. Kondisi pasien saat pemeriksaan juga mempengaruhi pemberian dosis radiasi dimana kondisi pasien yang sudah ganas tiroidnya diberikan dosis yang tinggi, agar hasil pemeriksaan yang dihasilkan memuaskan.

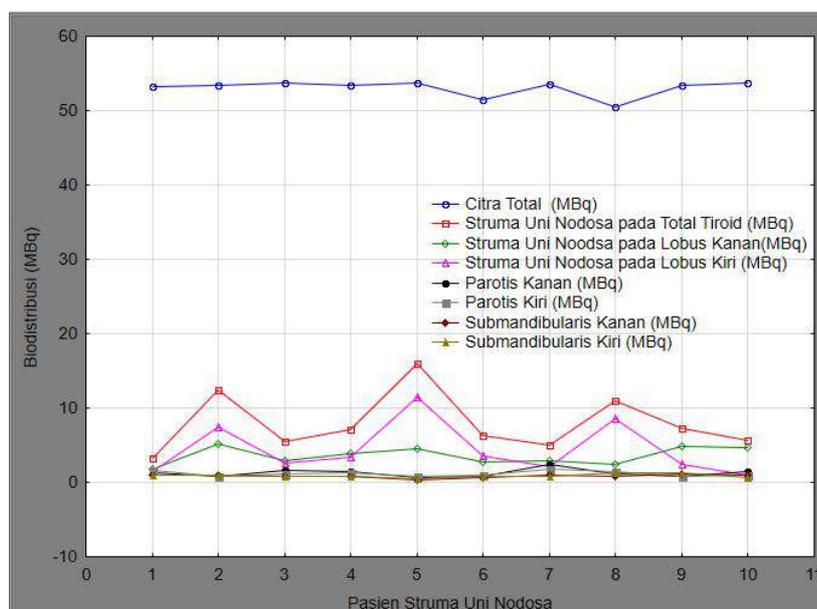
3.1 Biodistribusi Tc^{99m} perteknetat pada kelenjar tiroid dan kelenjar ludah pasien *struma uni nodosa*

Gambar 2 menunjukkan rerata biodistribusi pada kelenjar tiroid pasien *struma uni nodosa*. Rerata biodistribusi radioisotop pada lobus kanan tiroid lebih tinggi dibandingkan dengan lobus kiri tiroid. Namun pada pasien 2, 5, 6 dan pasien 8 tidak sesuai dengan hipotesis, dimana biodistribusi pada lobus kiri lebih tinggi dibandingkan dengan lobus kanan. Hal ini dapat dipengaruhi oleh kondisi tubuh pasien dan ukuran dari kelenjar tiroid pasien. Menurut (Praktiser, 2000) pada 48% orang memiliki ukuran lobus kanan lebih besar dibandingkan dengan lobus kiri, sedangkan 12% orang memiliki ukuran lobus kiri lebih besar dibandingkan dengan lobus kanan. Hal ini sesuai dengan hipotesis dimana biodistribusi radioisotop pada lobus kanan lebih tinggi dibandingkan dengan lobus kiri (Syarifuddin, 2006).

Biodistribusi tertinggi untuk kelenjar tiroid terdapat pada pasien no urut 2, 5 dan 8. Pasien no urut 2 dengan inisial RJ dari pencitraan terlihat kedua lobus membesar dengan biodistribusi pada lobus kiri lebih besar dibandingkan lobus kanan. Pada pasien RJ indikasi nodul dingin dari hasil diagnosis dokter setelah pemeriksaan dilakukan. Biodistribusi pada kelenjar ludah tertinggi pada kelenjar parotis kiri hal ini dikarenakan bahwa kelenjar parotis mempunyai posisi yang terdekat dengan tiroid lobus kiri.

Pada pasien no urut 5 dengan inisial DS didapatkan biodistribusi tertinggi pada total tiroid, sedangkan antara lobus kiri dan lobus kanan didapatkan biodistribusi yang paling tinggi pada lobus kiri. Biodistribusi pada kelenjar ludah tertinggi pada kelenjar parotis kiri hal ini dikarenakan bahwa kelenjar parotis mempunyai posisi yang terdekat dengan tiroid lobus kiri.

Pada pasien no urut 8 dengan inisial DT didapatkan hasil sama seperti pasien no urut 2 dan 5, dari hasil pencitraan didapatkan kedua lobus membesar dengan biodistribusi radioisotop yang tidak rata, dimana biodistribusi radioisotop pada lobus kiri lebih besar dibandingkan dengan lobus kanan. Pada Gambar 2 juga terlihat bahwa besarnya dosis injeksi pada pasien tidak mempengaruhi besarnya distribusi radioisotop di kelenjar tiroid. Hal ini disebabkan dosis injeksi yang diberikan pada pasien tidak terdistribusi seluruhnya di kelenjar tiroid. Urutan biodistribusi pada kelenjar ludah dari yang terbanyak yaitu kelenjar parotis kanan, kelenjar parotis kiri, kelenjar *submandibularis* kiri dan kelenjar *submandibularis* kanan. Hal ini didapat karena biodistribusi menuju kelenjar yang terbesar.

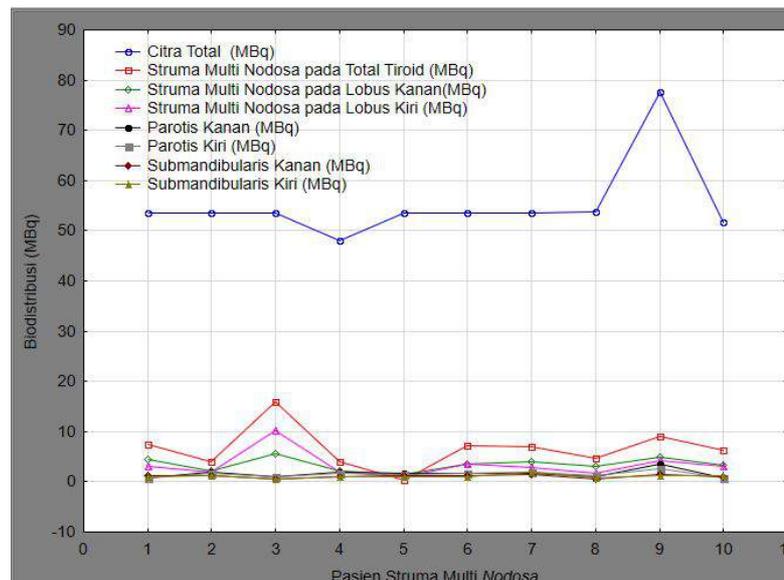


Gambar 2 Biodistribusi Tc^{99m} perteknetat pada kelenjar tiroid dan kelenjar ludah pasien *struma uni nodosa*

3.2 Biodistribusi Tc^{99m} perteknetat pada kelenjar tiroid dan kelenjar ludah pasien *struma multi nodosa*

Gambar 3 menunjukkan rerata biodistribusi pada kelenjar tiroid pasien *struma multi nodosa*. Terlihat rerata biodistribusi radioisotop pada lobus kanan tiroid lebih tinggi dibandingkan dengan lobus kiri tiroid. Namun pada pasien no urut 3 dengan inisial WN memiliki biodistribusi radioisotop pada lobus kiri lebih besar dibandingkan dengan lobus kanan. Pada pasien no urut 4 dengan inisial SR mengalami penurunan pada citra total hal ini dikarenakan diagnosis dokter untuk pasien SR adalah *struma nodosa* non toksik atau penurunan fungsi kelenjar tiroid. Pada pasien no urut 9 dengan inisial BE dari hasil pencitraan kelenjar tiroid didapatkan kedua lobus tiroid suprasternal (nodul panas), terjadi pembesaran, asimetris dimana lobus kanan lebih besar dibandingkan lobus kiri, dengan distribusi radioisotop tidak rata. Diagnosis pasien BE *struma multi nodosa* dalam keadaan eutiroid dimana fungsi kelenjar tiroid berjalan dengan normal tetapi terjadi pembesaran. Hal ini dapat disebabkan oleh tumor dan kelainan kadar hormon dimana keadaan fisiologis normal terganggu atau oleh pengaruh obat-obataan.

Biodistribusi radioisotop pada tubuh akan menurun sejalan dengan waktu, namun karena waktu pengambilan sampel yang tidak berlangsung lama. Hal ini dikarenakan posisi pasien yang setengah menengadah serta mengingat pasien akan menolak dilakukan berkali-kali pengambilan data, faktor inilah penyebab tidak dapat dilakukan pemeriksaan yang berkali-kali. Biodistribusi Tc^{99m} perteknetat pasien *struma multi nodosa* lebih banyak terdistribusi dibandingkan *struma uni nodosa*, karena jumlah nodul yang mempengaruhi dimana semakin banyak jumlah nodul pada pasien tersebut. Maka biodistribusi radioisotop lebih banyak terdistribusi. Dari hasil biodistribusi pada kelenjar ludah terdapat biodistribusi tertinggi pada kelenjar parotis kanan, sedangkan yang biodistribusi terendah pada kelenjar parotis kiri. Hal ini dikarenakan radioisotop terdistribusi sesuai aliran darah serta kelenjar parotis merupakan kelenjar ludah terbesar hal inilah yang menyebabkan biodistribusi pada kelenjar tersebut lebih besar dibandingkan dengan kelenjar ludah *submandibularis*.



Gambar 3 Biodistribusi Tc^{99m} perteknetat pada kelenjar tiroid dan kelenjar ludah pasien *struma multi nodosa*

3.3 Perbandingan antara *uni nodosa* dan *multi nodosa* dari *scan* tiroid dengan uji Wilcoxon

Perbandingan antara *uni nodosa* dan *multi nodosa* dari *scan* tiroid dengan uji Wilcoxon ditunjukkan pada Tabel 2. perbandingan total tiroid *struma uni nodosa* dan total tiroid *struma multi nodosa*, total tiroid dilakukan sebagai uji wilcoxon karena biodistribusi radioisotop lebih banyak pada kelenjar tiroid terkhusus pada total tiroid, hal inilah yang dilakukan untuk membandingkan biodistribusi radioisotop pada total tiroid pasien *struma uni nodosa* dan *struma multi nodosa*. Pada Tabel 2 nilai Valid-N merupakan jumlah masing-masing parameter uji yaitu hasil cacahan total tiroid pada pasien *struma uni nodosa* dan *struma multi nodosa*. Nilai T menyatakan rata-rata range dari data

variabel yang di uji. Nilai Z menyatakan koefisien standar. Sedangkan, p-value merupakan nilai probabilitas atau kebermaknaan hasil uji tersebut.

Tabel 2 Perbandingan biodistribusi Tc^{99m} perteknetat antara pasien *struma uni nodosa* dan *struma multi nodosa* dengan uji wilcoxon

	Valid – N	T	Z	p-value
Total Tiroid <i>Struma uni nodosa</i> dan Total Tiroid <i>Struma multi nodosa</i>	10	4,00	2,41	0,016

Data biodistribusi radioisotop Tc^{99m} perteknetat di diurutkan sesuai pasien masing-masing. Dari perbandingan antara hasil *Scan* Tiroid pada *struma uni nodosa* dan *struma multi nodosa*. Untuk menentukan perbandingan total tiroid *struma uni nodosa* dan *struma multi nodosa* sama atau tidak, dibuat hipotesis H_0 dimana total tiroid *struma uni nodosa* dan *struma multi nodosa* sama, sedangkan H_1 dimana total tiroid *struma uni nodosa* dan *struma multi nodosa* tidak sama, dengan syarat H_0 diterima atau tidak berdasarkan nilai probabilitas. Dimana, apabila nilai probabilitas $> 0,05$ maka H_0 diterima, lalu apabila nilai probabilitas $< 0,05$ maka H_1 ditolak.

Dari hasil uji wilcoxon terlihat p-value atau nilai probabilitas sebesar 0,016. Maka keputusan yang diambil adalah H_0 ($0,016 < 0,05$). Hal ini menunjukkan biodistribusi Tc^{99m} perteknetat pada total tiroid pasien *struma uni nodosa* dan *struma multi nodosa* ditolak merupakan pengujian signifikan. Hal ini menunjukkan hasil uji yang dilakukan tidak sama dengan hipotesis yang dilakukan wawancara dengan dokter.

IV. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa rerata biodistribusi Tc^{99m} perteknetat pada pasien *struma multi nodosa* lebih tinggi dari pada *struma uni nodosa*. Rerata biodistribusi pada lobus kanan lebih tinggi dari pada lobus kiri. Dari hasil biodistribusi pada kelenjar ludah terdapat biodistribusi pada kelenjar ludah parotis lebih tinggi dari pada kelenjar ludah *submandibularis*. Dari hasil uji wilcoxon terlihat nilai probabilitas sebesar 0,016 maka keputusan yang diambil adalah H_0 ($0,016 < 0,05$). Hal ini menunjukkan biodistribusi Tc^{99m} perteknetat pada total tiroid pasien *struma uni nodosa* dan *struma multi nodosa* tidak sesuai dengan hipotesis awal.

DAFTAR PUSTAKA

- IAEA, 2005, Applying Radiation Safety Standards In Nuclear Medicine, Sales and Promotion Unit, Austria.
- Incidence and Prevalence Data, 2012, *nontoxic uninodular goiter; thyroid nodule*. Capitola : Timely Data Resources, Inc. Style Sheet <http://eresources.pnri.go.id:2058/docview>, diakses Mei 2015
- Praktiseer, S.U., 2000, Thyroid gland on overview, part 2 Geneeskunde. *The Medicine Journal*, hal 447-467
- Sharp, P. F., dan Gemmel, H.G., 2005, *Practical Nuclear Medicine*, Third Edition, Springer-Verlag, London.
- Syahfreadi, 2008, Ketepatan Pemeriksaan Klinis, Sitologi Aspirasi Jarum Halus dan Potong Beku Pada Nodul Tunggal Tiroid, *Tesis*, FK, USU, Medan.
- Syaifuddin, 2006, Anatomi dan Fisiologi Untuk Mahasiswa Keperawatan, Edisi 3, EGC, Jakarta.
- Tonacchera, M., Pinchera, A., & Vitty, P., 2009, Assesment of nodular goiter. *Journal of best practice & research clinical endocrinology and metabolism*. Pisa : Elsevier.

PERHITUNGAN MATRIKS *COLLISION PROBABILITY* DALAM SEL BAHAN BAKAR NUKLIR BERBENTUK SILINDER

Mohammad Ali Shafii¹

¹Jurusan Fisika FMIPA Universitas Andalas, Kampus Limau Manis, Padang Sumatera Barat
Email: mashafii@fmipa.unand.ac.id

ABSTRAK

Salah satu metode untuk menyelesaikan persamaan transport neutron dalam sel bahan bakar nuklir adalah metode *collision probability* (CP). Hal penting dalam metode CP adalah perhitungan matriks CP atau lebih dikenal sebagai P_{ij} yang memiliki peran penting dalam menentukan distribusi fluks neutron dalam teras reaktor. Penelitian ini menggunakan pendekatan *flat flux* di setiap *region* sel untuk setiap grup energi. Matriks CP ini bergantung pada banyaknya *mesh* di setiap *region* sel. Matriks CP yang dibentuk dari distribusi *mesh* akan menghasilkan matriks berjumlah $n \times n$, dengan n adalah banyaknya *mesh* di setiap *region*. Sebagai contoh jumlah *mesh* total dalam sel berjumlah 6 *mesh*, sehingga matriks yang dibentuk adalah matriks P_{ij} berorde 6×6 untuk setiap grup energi. Secara umum hasil perhitungan P_{ij} dalam penelitian dapat digunakan untuk menghitung distribusi fluks neutron.

Kata kunci: matriks collision probability, sel bahan bakar nuklir, grup energi.

ABSTRACT

One of several methods to solve the neutron transport equation in the nuclear fuel cell is the collision probability (CP) method. The most important thing in the CP method is the calculation of the matrix CP, called P_{ij} , that have an important role in determining the distribution of neutron flux in the nuclear reactor core. This study uses a flat flux approach in each region of the cell for each energy group. The CP matrix is dependent on the number of mesh in each region of cell. The formed CP matrix from the mesh distribution will produce of matrix amount to the $n \times n$, where n is the number of mesh in each region. For example, the total number of mesh in the cell is amount to 6 meshes, so that the formed matrix is the P_{ij} matrix of order 6×6 for each energy group. Generally, the results of the P_{ij} matrix calculations in this study are in accordance with the theory.

Keywords: collision probability matrix, nuclear fuel cell, energy group.

I. PENDAHULUAN

Penyelesaian integral persamaan transport dengan metode *collision probability* (CP), pada umumnya menggunakan pendekatan *flat flux* (FF), yaitu fluks neutron dalam tiap *region* dianggap tetap. Pendekatan ini memungkinkan fluks neutron akan menjadi maksimal dalam bahan bakar reaktor karena neutron bergerak ke semua arah dan akan mengalami penurunan ketika sampai pada batas-batas perisai (*shielding*) (Canteach, 2004). Pada reaktor nuklir yang menggunakan pendekatan FF, material fisi lebih banyak digunakan dibandingkan dengan reaktor nuklir konvensional dengan dimensi yang sama (Cassell dan Williams, 2003). Pendekatan FF ini sering dipakai dalam metode CP untuk menyelesaikan masalah transport neutron dalam sel bahan bakar nuklir (Wu dan Roy, 2003). Pada metode CP, pemilihan bentuk geometri sel sangat fleksibel tidak harus bentuk silinder tetapi dapat juga berbentuk segi enam, terutama dalam implementasi spasial menjadi bentuk zona, dimana pendekatan FF sangat diperlukan (de Camargo dkk., 2009).

Untuk melihat distribusi fluks neutron di setiap *region* dalam pin sel bahan bakar nuklir perlu ditinjau titik-titik fluks di setiap *region*-nya. Titik-titik fluks dengan interval tertentu di dalam sel disebut titik-titik *mesh* (selanjutnya disebut *mesh* saja). Jika jarak antar *mesh* sama, maka fluks neutron di setiap *mesh* dianggap FF. Karena penampang lintang total di setiap *region* dianggap tetap, maka fluks neutron dan sumber neutron di *region* tersebut dapat dianggap tetap juga. Perhitungan distribusi fluks neutron tidak dapat secara langsung dilakukan, karena pada umumnya orde *mesh* spasialnya sangat kecil, demikian juga *mesh* energinya, akibatnya total *mesh* yang harus dilakukan untuk seluruh teras menjadi sangat besar. Untuk itulah dilakukan homogenisasi sel bahan bakar dengan metode CP (Novitrian, dkk., 2002; Shafii dan Su'ud., 2007).

Penanganan geometri sel bahan bakar nuklir biasanya dilakukan dengan membatasi pilihan geometri sel yang akan dihitung. Selanjutnya untuk masing-masing jenis geometri ini dilakukan

perhitungan matriks CP dengan menggunakan integrasi analitik terhadap sudut, serta perhitungan numerik untuk kasus yang rumit, seperti perhitungan fungsi Bickley-Naylor, faktor Dancoff dan lain-lain. Dengan demikian, bila pada suatu kode komputer tertentu tidak terdapat pilihan geometri yang tepat, untuk menambahkan kemampuan geometri pada kode komputer tersebut diperlukan usaha yang sangat besar.

Penelitian ini akan memperlihatkan perhitungan matriks CP yang mengandung fungsi Bickley-Naylor dalam peristiwa interaksi neutron dengan nuklida penyusun sel bahan bakar nuklir yaitu U-Pu-Nitrid berdasarkan analisis energi multigrup. Komposisi sel bahan bakar nuklir berbentuk silinder ini telah dilakukan pada penelitian sebelumnya (Shafii, dkk., 2010). Matriks CP yang dihitung dalam penelitian ini adalah matriks CP untuk proses hamburan dan *escape*. Data *library* yang digunakan adalah JFS-3-J33 dari JAEA Japan. Hasil perhitungan matriks CP yang diperoleh dalam penelitian ini selanjutnya akan dipakai dalam perhitungan distribusi fluks neutron.

II. METODE PENELITIAN

Probabilitas neutron yang dipancarkan secara menyeluruh dan isotropik di *region i* dan selanjutnya mengalami tumbukan di *region j* untuk setiap grup energi *g* adalah (Shafii dkk., 2007)

$$\Sigma_{jg} V_j \phi_{jg} = \frac{1}{k_{eff}} \sum_i V_i P_{ijg} S_{ig} \quad (1)$$

dengan $V_i = \pi(r_i^2 - r_{i-1}^2)$. dan Σ_j menyatakanampang lintang makroskopik total pada kulit ke *j*. Matriks probabilitas tumbukan pada persamaan (1) berbentuk (Okumura dkk., 2007)

$$P_{ij} = \frac{2}{\sum_i V_i} \int_0^{r_i} d\rho \left[K_{i3}(\lambda_{ij}^1) - K_{i3}(\lambda_{ij}^1 + \lambda_i) - K_{i3}(\lambda_{ij}^1 + \lambda_j) + K_{i3}(\lambda_{ij}^1 + \lambda_i + \lambda_j) \right. \\ \left. + K_{i3}(\lambda_{ij}^2) - K_{i3}(\lambda_{ij}^2 + \lambda_i) - K_{i3}(\lambda_{ij}^2 + \lambda_j) + K_{i3}(\lambda_{ij}^2 + \lambda_i + \lambda_j) \right] \quad (2)$$

dengan $\lambda_k = \Sigma_k(x_k - x_{k-1})$, $\lambda_{ij}^1 = \sum_{k=i-1}^{j-1} \lambda_k$ dan $\lambda_{ij}^2 = \sum_{k=1}^{i-1} \lambda_k + \sum_{k=1}^{j-1} \lambda_k$ (untuk $r_i < r_j$) dan

$K_{in}(x) = \int_0^{\pi/2} d\theta \sin^{n-1} \theta \exp(-\frac{x}{\sin \theta})$ adalah fungsi Bickley-Naylor orde tiga.

Untuk kasus CP yang terjadi pada kulit ke-*i* tepat sama dengan kulit ke-*j* (*self-collision probability*), maka CP pada persamaan (2) berbentuk (Okumura dkk., 2007)

$$P_{ii} = \frac{2}{\sum_i V_i} \int_0^{r_{i-1}} d\rho \left[2\lambda_i - 2K_{i3}(0) + 2K_{i3}(\lambda_i) + K_{i3}(\lambda_{ii}) - 2K_{i3}(\lambda_{ii} + \lambda_i) \right. \\ \left. + K_{i3}(\lambda_{ii} + 2\lambda_i) \right] + \frac{2}{\sum_i V_i} \int_{r_{i-1}}^{r_i} d\rho \left[2\lambda_i - K_{i3}(0) + K_{i3}(2\lambda_i) \right] \quad (3)$$

dengan $\lambda_{ii} = 2 \sum_{k=1}^{i-1} \lambda_k$. Pada kasus ini, syarat batas yang digunakan adalah syarat batas isotropik

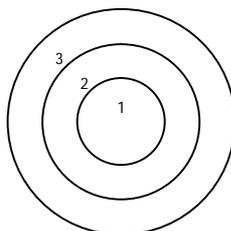
karena hasilnya lebih akurat dan tidak banyak memakan waktu komputasi dibandingkan dengan syarat batas pantulan sempurna. Probabilitasnya menjadi berubah karena neutron yang dipancarkan di kulit ke *i* akan keluar dari batas terluar tanpa mengalami tumbukan apapun (*escape probability*), sehingga CP pada persamaan (3) menjadi (Okumura dkk., 2007)

$$P_{is} = \frac{2}{\sum_i V_i} \int_0^{r_i} d\rho \left\{ K_{i3}(\lambda_{is}^1) - K_{i3}(\lambda_{is}^1 + \lambda_i) + K_{i3}(\lambda_{is}^2) - K_{i3}(\lambda_{is}^2 + \lambda_i) \right\} \quad (4)$$

dengan $\lambda_{is}^1 = \sum_{k=i+1}^N \lambda_k$ dan $\lambda_{is}^2 = \sum_{k=1}^{i-1} \lambda_k + \sum_{k=1}^N \lambda_k$.

Penelitian ini hanya fokus pada penyelesaian proses transport neutron dalam satu sel bahan bakar nuklir. Geometri sel dipilih berbentuk silinder yang dibagi dalam tiga *region* yaitu: *region 1*

adalah bahan bakar (*fuel*), *region 2* adalah kelongsong (*cladding*) dan *region 3* adalah pendingin (*coolant*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Pembagian *region* dalam sel.

Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah campuran U-Pu Nitrid, bahan struktur kelongsongnya adalah stainless steel dan Pb-Bi sebagai pendingin. Pembagian grup energi dipilih untuk 70 grup berdasarkan struktur grup energi SLAROM JFS-3-J33 (Hazama, dkk., 2008). Garis besar program perhitungan matriks CP dan aspek komputasinya adalah sebagai berikut :

- Membaca nilai penampang lintang total yang dihitung dari proses homogenisasi sel bahan bakar nuklir.
- Menentukan volume untuk setiap *region*.
- Menghitung penampang lintang total hamburan tiap volume *region* dan grup energi.
- Menghitung produksi fisi neutron tiap volume *region* dan grup energi.
- Menghitung penampang lintang serapan tiap volume *region* dan grup energi.
- Menghitung matriks hamburan elastik, inelastik dan $n2n$ di setiap *region* untuk setiap grup energi sumber ke target.
- Menghitung komponen matriks hamburan dan serapan total.
- Menghitung matrik CP dengan menyelesaikan fungsi Bickley-Naylor pada persamaan (II.62) dan (II.68) berdasarkan pada ekspansi deret. Untuk melakukan integrasi dalam menghitung matriks CP, digunakan metode integrasi Gauss dengan orde yang dapat dipilih sampai 40 sebagai faktor bobot.
- Menghitung matrik probabilitas *escape* dengan menyelesaikan fungsi Bickley-Naylor pada persamaan (2) berdasarkan pada ekspansi deret. Untuk melakukan integrasi dalam menghitung matriks CP, digunakan metode integrasi Gauss dengan orde yang dapat dipilih sampai 40 sebagai faktor bobot.
- Iterasi dilakukan untuk menghitung kembali matriks CP dan probabilitas *escape* berdasarkan pada persamaan (4) hingga konvergen.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan matriks CP atau lebih dikenal sebagai P_{ij} dalam penelitian ini menggunakan pendekatan FF di setiap *region* pada semua energi. Ketika penampang lintang neutron homogen di seluruh *region*, maka P_{ij} tetap untuk seluruh *region i*. Kondisi ini muncul karena adanya kenyataan bahwa distribusi fluks neutron menjadi rata di seluruh *region* sel (Takeda, 1974). Pada sebagian besar heterogenitas sistem, fluks spasial dianggap rata, terutama di luar resonan. Akibatnya pendekatan FF dipakai per *region*, sehingga P_{ij} yang digunakan pun berdasarkan pada perhitungan *region per region* (Stammler dan Abate, 1983). Matriks CP ini bergantung pada banyaknya *mesh* di setiap *region* sel. Matriks yang dibentuk dari distribusi *mesh* akan menghasilkan matriks berjumlah $n \times n$, dengan n adalah banyaknya *mesh* di setiap *region*. Sebagai contoh jumlah *mesh* total dalam sel berjumlah 6 *mesh*, sehingga matriks yang dibentuk adalah matriks P_{ij} berorde 6×6 untuk setiap grup energi. Hasil perhitungan P_{ij} , untuk tiga grup energi pertama yang mewakili energy tinggi dan tiga grup energi terakhir yang mewakili rendah dapat dilihat pada Gambar 2. Jika *mesh* total dinaikkan menjadi 10, maka matriks P_{ij} akan membentuk matriks berorde 10×10 dan seterusnya. Matriks probabilitas *escape* akan membentuk matriks berorde $1 \times n$ karena dalam peristiwa ini neutron yang lahir di titik i

tidak mengalami tumbukan di titik j . Matriks CP yang dihasilkan dengan menggunakan pendekatan FF digunakan untuk menghitung spektrum neutron dengan menggunakan persamaan (1).

```

energy group : 1
escape probability pescj[i,j]=1,maxcrg
8.67715935077948E-0001 8.66814081465532E-0001 8.65853415132618E-0001 8.70435891224459E-0001 8.90691753657931E-0001 9.07065312674714E-0001
collision prob. pij i! j ->
1 5.29097064188061E-0002 1.20341444261998E-0001 1.79348359165704E-0001 4.85268691592724E-0001 7.63452226976876E-0002 8.54749332247084E-0002
2 4.02154379989011E-0002 1.23956935004574E-0001 1.82821083027099E-0001 4.87347512591486E-0001 7.64649414756704E-0002 8.55425181020963E-0002
3 3.58253780900797E-0002 1.10117485565682E-0001 1.88436877832826E-0001 4.95512979723452E-0001 7.68858439279542E-0002 8.58204472641715E-0002
4 3.43285623388805E-0002 1.03880366423737E-0001 1.76134973125419E-0001 5.08686791670922E-0001 7.88213048989180E-0002 8.71479210762052E-0002
5 3.45288081085641E-0002 1.03347061386600E-0001 1.73995951039465E-0001 5.02594553803351E-0001 8.35352616921486E-0002 9.10610137026162E-0002
6 3.48460905715495E-0002 1.04378588193643E-0001 1.7439806608990E-0001 4.99917804976607E-0001 8.24686462926379E-0002 9.49657505063645E-0002
energy group : 2
escape probability pescj[i,j]=1,maxcrg
8.93945735315508E-0001 8.92705141304437E-0001 8.91409050482117E-0001 8.95028741440790E-0001 9.10708568127018E-0001 9.24184785253164E-0001
collision prob. pij i! j ->
1 5.06551225836861E-0002 1.21067748572133E-0001 1.84673939440142E-0001 4.92524404424017E-0001 7.12342677387817E-0002 7.96502869842101E-0002
2 4.04379420055886E-0002 1.23974793157863E-0001 1.87345455434418E-0001 4.93884159767049E-0001 7.12824644937011E-0002 7.9655196170242E-0002
3 3.68987460933303E-0002 1.12751035974956E-0001 1.91825875317798E-0001 5.00041719013369E-0001 7.15531315507620E-0002 7.98169887866874E-0002
4 3.57067331075390E-0002 1.07788754807110E-0001 1.81969191331358E-0001 5.11013278795955E-0001 7.29625300045009E-0002 8.07828528069485E-0002
5 3.58724254649713E-0002 1.0735685784331E-0001 1.80272938089463E-0001 5.05739012708890E-0001 7.63298349121537E-0002 8.35531419340928E-0002
6 3.61523520344178E-0002 1.08262976609136E-0001 1.80693572993243E-0001 5.03920232534821E-0001 7.55886536046035E-0002 8.64229847319576E-0002
energy group : 3
escape probability pescj[i,j]=1,maxcrg
8.94957669627031E-0001 8.94231031630653E-0001 8.94421373756369E-0001 9.00245910895974E-0001 9.14078290187123E-0001 9.26679449079450E-0001
collision prob. pij i! j ->
1 5.57175198719802E-0002 1.34176364919883E-0001 2.05621001806012E-0001 4.42110782530681E-0001 7.65795492636274E-0002 8.55696166178491E-0002
2 4.48130252088787E-0002 1.37322160762781E-0001 2.08577592487884E-0001 4.43513320740620E-0001 7.66713431277750E-0002 8.56217790070607E-0002
3 4.10858085032959E-0002 1.25513317891780E-0001 2.13640433481942E-0001 4.49556741845754E-0001 7.70821668192041E-0002 8.59327550235528E-0002
4 3.99244159844693E-0002 1.20551945719305E-0001 2.03747564854374E-0001 4.60602630577004E-0001 7.87581140718274E-0002 8.71667457003711E-0002
5 4.00627523443473E-0002 1.19974179237503E-0001 2.01746469980559E-0001 4.55335491288093E-0001 8.21093533595557E-0002 8.98917466152422E-0002
6 4.03477303158563E-0002 1.20900645244778E-0001 2.02112261453856E-0001 4.53558564019213E-0001 8.13084084944789E-0002 9.28087366430937E-0002
energy group : 68
escape probability pescj[i,j]=1,maxcrg
4.67808165638431E-0001 4.97377902076859E-0001 5.75878866768582E-0001 7.04410505169733E-0001 7.58217699406339E-0001 7.92008809477216E-0001
collision prob. pij i! j ->
1 2.0002585529713E-0001 2.92471647400913E-0001 3.36158655392559E-0001 8.67794820878681E-0002 3.11051367101737E-0002 3.50373630644330E-0002
2 9.82147584312396E-0002 3.14612002078689E-0001 3.85675516324146E-0001 9.38526240368571E-0002 3.33856965274228E-0002 3.75127619641561E-0002
3 6.69890728037907E-0002 3.24221153560364E-0001 4.52127822315623E-0001 1.15558854063903E-0001 3.97270151213730E-0002 4.42808677405400E-0002
4 6.58650874374331E-0002 2.16042254942740E-0001 4.44717593845557E-0001 1.53905791204464E-0001 5.23835288362192E-0002 5.64649155111595E-0002
5 6.73881188343796E-0002 2.14856850962092E-0001 4.31309085236655E-0001 1.48700097573067E-0001 6.19276201946634E-0002 6.44996763062556E-0002
6 6.84703486721841E-0002 2.18674255115558E-0001 4.28819084741763E-0001 1.44025027544208E-0001 5.89965031294328E-0002 7.15827344177218E-0002
energy group : 69
escape probability pescj[i,j]=1,maxcrg
6.11389308370813E-0002 1.01550736926803E-0001 2.67811176896853E-0001 6.09043415477650E-0001 6.99596361134109E-0001 7.46800666766152E-0001
collision prob. pij i! j ->
1 3.66866273494198E-0001 3.18183197587485E-0001 1.40517021962091E-0001 7.99836837118431E-0003 1.42841722436795E-0003 1.62837191052720E-0003
2 1.07369057587606E-0001 3.25024204497461E-0001 2.92255325613570E-0001 1.36213704032628E-0002 2.40788232514680E-0003 2.73593603851447E-0003
3 2.79141608736711E-0002 1.79791341162645E-0001 4.48058042903819E-0001 3.97077353148201E-0002 6.67218067710453E-0003 7.49183658067722E-0003
4 2.69827552485460E-0002 1.39565119453540E-0001 6.82728233086860E-0001 1.04304302816031E-0001 1.72615648284416E-0002 1.84250385436959E-0002
5 2.86403116295137E-0002 1.43197548167804E-0001 6.69396224159455E-0001 1.02163091162555E-0001 2.26363827846377E-0002 2.30198927250713E-0002
6 2.94567537015602E-0002 1.47524212589152E-0001 6.67680044238028E-0001 9.83159966949868E-0002 2.12466592009649E-0002 2.67414714421520E-0002
energy group : 70
escape probability pescj[i,j]=1,maxcrg
4.77227180753400E-0002 8.22909272507499E-0002 2.25971032346618E-0001 5.25776383160758E-0001 6.38715241656641E-0001 6.96681442585731E-0001
collision prob. pij i! j ->
1 3.70413688988371E-0001 3.12915282825702E-0001 1.18859837164928E-0001 1.58804202194290E-0002 2.81798664903520E-0003 3.23652804567367E-0003
2 1.05609344406673E-0001 3.16722919645563E-0001 2.65509561200702E-0001 2.82662245394575E-0002 4.94212255402461E-0003 5.65242533935228E-0003
3 2.35953773025910E-0002 1.63706494116493E-0001 3.86452434115376E-0001 8.78743758000266E-0002 1.43121609514289E-0002 1.61348517241839E-0002
4 1.92374592267229E-0002 1.04261483702314E-0001 5.44501226570430E-0001 2.26306880528568E-0001 3.81820799138938E-0002 4.05919594509427E-0002
5 2.05899101871657E-0002 1.06925306925640E-0001 5.23107274936388E-0001 2.29040569022697E-0001 5.39504927666242E-0002 5.46085290515021E-0002
6 2.13362896597781E-0002 1.10977816847672E-0001 5.23456193198138E-0001 2.18777886884125E-0001 5.04834961892674E-0002 6.50469060249110E-0002

```

Gambar 2. Matriks P_{ij} untuk 3 grup energi tinggi dan 3 grup energi rendah.

Di dalam *library* SLAROM, pembagian struktur grup energi library JFS-3-J33-70 grup untuk energi tinggi (orde MeV) diwakili oleh grup 1 sampai grup 19, energi menengah (orde keV) diwakili oleh grup 20 sampai grup 37, sedangkan energi rendah (orde eV) diwakili oleh grup 38 sampai grup 70. Secara umum, pembagian grup ini dibagi atas dua daerah, yaitu daerah reaksi cepat (*fast region*) yang diwakili oleh grup 1 sampai 37 dan daerah termal yang diwakili oleh grup 38 sampai 70 (Hazama dkk, 2006).

Dari Gambar (1) dapat disimpulkan bahwa pada geometri silinder hasil perhitungan matriks CP sangat dekat di daerah dengan energi yang sama, baik di daerah energi tinggi maupun di daerah energi rendah. Selain itu nilai matriks P_{11} , P_{12} dan P_{13} lebih besar dari P_{14} , P_{15} , P_{16} . Hal ini terjadi

karena *region* 1 sampai 3 yang berisi bahan bakar jauh lebih tebal dari pada *region* 4 sampai 6 yang berisi *cladding* dan *coolant* disamping harga penampang lintang reaksi totalnya jauh terlalu besar. Bila penampang lintang ini sangat besar maka sebagian besar neutron yang lahir di *region* pertama akan mengalami tumbukan pertama di *region* itu sendiri, atau untuk neutron yang lahir di bagian luar *region* 1 sebagian akan mengalami tumbukan pertama di *region* 2 (Su'ud, 1998). Secara umum proses tumbukan seperti ini yang diinginkan, dengan kata lain hasil perhitungan matriks CP ini telah sesuai dengan referensi.

IV. KESIMPULAN

Metode CP yang mendasarkan diri pada integral transport telah terbukti sangat efektif dan cocok dalam menyelesaikan masalah transport neutron dalam reaktor nuklir, terutama untuk menghitung matriks CP dan distribusi fluks di setiap *region* dalam sel bahan bakar nuklir. Penggambaran peristiwa CP dan *escape* dinyatakan sebagai integral bentuk fungsi Bickley- Naylor orde tiga dalam volume *region* dengan penampang lintang hamburan totalnya bersifat isotropik. Hasil perhitungan matriks CP ini akan menjadi dasar untuk perhitungan fluks neutron.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini dibiayai oleh Ditlitabmas Dikti Kemenristekdikti melalui LPPM Unand untuk skema penelitian Strategis Nasional tahun 2015 dengan kontrak No.02/H.16/SN/LPPM/2015. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Prof. Zaki Su'ud di Departemen Fisika ITB atas diskusi yang mendalam tentang masalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Canteach, 2004, Candu Fundamental; Neutron Flux Control, <http://canteach.candu.org/library/20040722.pdf>, (diakses: Mei 2010).
- Cassell, J.S. dan Williams, M.M.R., 2003, An Integral Equation Arising in Neutron Transport Theory, *Annals of Nuclear Energi* (30), 1009-1031.
- de Camargo, D. Q., Bodmann, B. E.J., Garcia, R. D.M. dan de Vilhena, M.T., 2009, A Three-Dimensional Collision Probability Method: Criticality and Neutron Flux in a Hexahedron Setup, *Annals of Nuclear Energi* (36), 1614-1618.
- Hazama, T., Chiba, G., dan Sugino, K., 2006, Development of a Fine and Ultra-Fine Group Cell Calculation Code SLAROM-UF for Fast Reactor Analyses, *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol. 43, No. 8, 908-918.
- Hazama, T., Chiba, G., Sato, W. dan Numata, K., 2008, SLAROM-UF: Ultra-Fine Group Cell Calculation Code for Fast Reactor (User's Manual), *Private Communication*.
- Novitrian, Su'ud, Z., dan Sutrisno, 2002, Nuclear Cell Homogenization Code for Thermal Reactors, *Prosiding Seminar Teknologi dan Keselamatan Reaktor Daya VII*, Bandung.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., dan Tsuchihashi, K., 2007, *SRAC 2006 : A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*, JAEA.
- Shafii, M. A. dan Su'ud, Z., 2007, Study of Development Homogenization Code Using General Geometry Approach, *Proceeding of International Conference on Advanced Nuclear Sciences and Engineering*, ITB-TokyoTech, Bandung.
- Shafii, M. A., Su'ud Z, Waris A, Kurniasih N, Ariani M, Yulianti Y., 2010, Collision Probability Method for Nuclear Fuel Cell Homogenization using Finite Element Method for Neutron Flux Interpolation, *AIP Conf. Proc.* 1325, 253-258.
- Su'ud, Z., 1998, Pengembangan Kode Komputer Untuk Homogenisasi Sel Bahan Bakar Reaktor Nuklir untuk Geometri Umum, *Lokakarya Komputasi Dalam Sains dan Teknologi Nuklir (VIII)* :24 - 25 Februari 1998.
- Stamm'ler, R.J.J., dan Abbate, M.J., 1983, *Method of Steady State Reactor Physics in Nuclear Design*, Academic Press, London.
- Takeda, T., 1974, An Accurate Method to Interpolated First-Flighth Collision Probability, *J. Nucl. Sci.Technol*, 11 (4), 165-168.
- Wu, G.J. dan Roy, R., 2003, A New Characteristics Algorithm for 3D Transport Calculations, *Annals of Nuclear Energi* (30), 1-16.

PENENTUAN *UPTAKE* TIROID DARI Tc^{99m} PERTEKNETAT (*IN VIVO*) DAN UJI HORMON TIROID (*IN VITRO*) PADA PASIEN HIPERTIROID

Silvia Eka Putri¹, Dian Milvita¹, Fadhil Nazir², Chavied Varuna³

¹Jurusan Fisika FMIPA Universitas Andalas, Padang, Indonesia

²PTKMR BATAN, Jakarta, Indonesia

³RSPP, Jakarta, Indonesia

e-mail: silviaekaputri19@yahoo.com

ABSTRAK

Telah dilakukan penentuan *uptake* tiroid dari 18 orang pasien hipertiroid (toksik dan non toksik) di salah satu rumah sakit di Jakarta. Diagnosis pasien dilakukan dengan *scan* tiroid (*in vivo*) dan uji nilai hormon tiroid (*in vitro*). *Scan* tiroid dilakukan dengan cara menginjeksikan Tc^{99m} perteknetat sebanyak (118-170) MBq secara intravena di lengan pasien, selanjutnya dilakukan pencitraan kelenjar tiroid selama 5 menit setelah injeksi menggunakan kamera gamma *dual head skylight* ADAC. Pada uji nilai hormon tiroid, pasien hipertiroid diambil darahnya sebanyak 5 cc. Pengujian nilai hormon dalam darah dilakukan menggunakan teknik *Radio Immuno Assay* (RIA) sehingga akan didapatkan nilai hormon *Triiodothyronine* (T3), *Thyroxine* (T4) dan *Thyroid Stimulating Hormone* (TSH) dalam darah. *Uptake* tiroid pasien hipertiroid toksik berada di atas batas normal angka penangkapan tiroid yaitu (8,54-16,67) % dan membutuhkan penanganan lebih lanjut terhadap kelainan fungsi tiroidnya. *Uptake* tiroid pasien hipertiroid non toksik masih berada dalam batas *uptake* normal yaitu (2,19-6,85) %.

Kata kunci : *uptake*, *scan* tiroid, *in vivo*, *in vitro*, hormon tiroid, *Radio Immuno Assay*.

ABSTRACT

Analysis thyroid uptake of 18 hyperthyroidism patients (toxic and non toxic) at a hospital in Jakarta has been conducted. Patients diagnosis was done with thyroid scan (in vivo) and test of Tc^{99m} pertechnetate (118-170) MBq intravenally in the patient's arm. Then imaging performed thyroid gland in the 5 minutes after injection by using gamma camera dual head skylight ADAC. At the test of thyroid hormone value, the patient's blood is taken amount 5 cc. Thyroid hormone test of thyroid in blood was done with Radio Immuno Assay (RIA), the purpose of this study was know Triiodothyronine (T3), Thyroxine (T4) and Thyroid Stimulating Hormone (TSH) in the blood. Thyroid uptake of toxic are above the normal range value of thyroid uptake (8,54-16,67) % and then patients needed further treatment for thyroid dysfunction. Thyroid uptake non toxic difusse still within the normal range (2,19-6,85) %

I. PENDAHULUAN

Kedokteran nuklir merupakan bidang yang memanfaatkan sumber radiasi terbuka untuk melakukan diagnosis penyakit, terapi radiasi internal dan penelitian. Sumber radiasi terbuka ini dimasukan ke dalam tubuh dengan cara diminum, dihirup atau disuntikan (*in vivo*) maupun proses laboratorium dari sampel pasien (*in vitro*). Pemeriksaan di kedokteran nuklir banyak membantu dalam mendiagnosis berbagai penyakit khususnya dalam penilaian fungsi organ serta metabolisme sel. Salah satu penyakit yang dapat dideteksi dengan teknik nuklir ini adalah hipertiroid.

Hipertiroid merupakan salah satu kondisi yang dapat dinilai melalui produksi hormon tiroid yang berlebihan. Hormon tiroid akan mempengaruhi pertumbuhan, perkembangan dan berbagai proses-proses di dalam sel. Kondisi gangguan fungsi kelenjar tiroid dapat dipantau melalui fungsi hormonal dan pencitraan (*scan*) kelenjar tiroid.

Scan kelenjar tiroid pada kasus hipertiroid merupakan studi pencitraan yang dilakukan sebagai evaluasi awal untuk menentukan besar, bentuk, letak serta jenis dari hipertiroid. *Scan* kelenjar tiroid dilakukan menggunakan detektor kamera gamma, untuk memperoleh hasil pencitraan yang akan diolah menggunakan teknik *Region of Interest* (ROI). Unsur Radioaktif yang digunakan untuk *scan* kelenjar tiroid adalah Teknesium-99 metastabil (Tc^{99m}) perteknetat.

Radiofarmaka disuntikan secara intravena pada lipatan lengan pasien kemudian akan mengikuti aliran darah ke seluruh tubuh (Bushberg, 2002). Aktivitas yang sampai di kelenjar tiroid tidak semuanya ditangkap oleh kelenjar tersebut. Kemampuan penangkapan radiofarmaka (*uptake*) oleh kelenjar tiroid pada kasus hipertiroid akan menentukan fungsi dari tiroid tersebut.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan persentase *uptake* pada kelenjar tiroid setelah injeksi radiofarmaka Tc^{99m} perteknetat ke dalam tubuh pasien. Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi dokter, untuk dapat mengetahui seberapa banyak tangkapan radiofarmaka Tc^{99m}

pereteknetat, sehingga dapat memastikan jenis gangguan pada fungsi kelenjar tiroid serta dapat membantu dalam mengambil keputusan diagnosis yang tepat pada pasien hipertiroid khususnya yang akan menjalani terapi.

II. METODOLOGI

Penelitian untuk menganalisis persentase *uptake* pada pasien hipertiroid dengan teknik *in vivo* yaitu radiofarmaka disuntikkan ke dalam tubuh pasien melalui pembuluh intervena di daerah kubiti (lipatan lengan). Pemeriksaan *scan* tiroid dilakukan menggunakan kamera gamma *dual head Skylight ADAC*. Saat pemeriksaan dilakukan, pasien berbaring ditempat tidur yang berada di bawah kamera gamma dengan posisi *supine* (berbaring) + ½ ekstensi hal ini dilakukan agar hasil pencitraan sebaik mungkin. Pemeriksaan *scan* tiroid dilakukan sebanyak 1 kali dengan rentang waktu 5 menit setelah penyuntikkan radiofarmaka. Hasil pencitraan diolah menggunakan teknik ROI pada lobus kanan, lobus kiri dan total tiroid. dan uji hormon tiroid (*in vitro*) Pengujian nilai kadar hormon dalam darah menggunakan teknik RIA yaitu penambahan radioisotop I^{125} sebagai perunut yang ditambahkan pada sampel darah, selanjutnya dilakukan pencacahan menggunakan *gamma counter*.

Untuk menguji hormon T3, T4 dan TSH, larutan standar, larutan kontrol dan sampel darah disimpan pada temperatur ruang sebelum digunakan (minimal 1 jam). Sel darah merah dipisahkan dengan serum di atas *sentrifus* selama 10 menit. Seratus μL serum dimasukkan ke dalam tabung berlabel kode pasien kemudian tambahkan 100 μL radioisotop (I^{125}) serta 1000 μL antiserum. Larutan tersebut dicampurkan menggunakan *mixer* selama dua jam. Air yang masih tersisa di dalam tabung dibuang dan kemudian dilakukan pencacahan menggunakan *gamma counter* selama 60 detik.

III. HASIL DAN DISKUSI

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan di salah satu rumah sakit di Jakarta diperoleh 14 orang perempuan dan 4 orang laki-laki, ini menunjukkan perbandingan jumlah pasien hipertiroid pada perempuan lebih banyak daripada laki-laki. Hal ini sesuai dengan literature pedoman klinis pediatric yang mengatakan bahwa penyakit hipertiroid lebih banyak diderita oleh perempuan dibandingkan laki-laki dengan perbandingan 2:1 (Schwart, 1995). Data awal pasien menunjukkan usia pasien berkisar antara (21-63) tahun, dimana dari data tidak ditemukan pasien yang berusia anak-anak. Dosis injeksi pada pasien masing-masing berkisar antara (118-170) MBq. Hal ini sesuai dengan nilai batas dosis (NBD) yang dianjurkan IAEA untuk Tc^{99m} Pereteknetat yaitu berkisar antara (111-185) MBq. Sukandar (1982) merumuskan persentase *uptake* tiroid dalam Persamaan 1

$$Uptaketiroid = \frac{counttiroid - countbackground}{countinjeksi} \times 100\% \quad (1)$$

dengan *count* tiroid adalah cacahan ROI pada tiroid, *count background* adalah cacahan di luar organ tiroid dan *count* injeksi adalah cacahan dari radiofarmaka yang diinjeksikan ke dalam tubuh pasien. Persentase *uptake* tiroid pada pasien hipertiroid dapat ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 menunjukkan rerata *uptake* pasien hipertiroid toksik dan non toksik yaitu berada dalam rentang (2,19-16,67) %, dengan rata-rata yaitu 9,85 %, *uptake* tertinggi terjadi pada pasien nomor 6 yaitu 16,67 % dan terendah pada pasien nomor 18 yaitu 2,19 %. Terlihat bahwa dengan diagnosis yang sama, persentase *uptake* yang akan berbeda-beda. Hal ini disebabkan karena tingkat sensitivitas tubuh masing-masing pasien berbeda sehingga mempengaruhi tangkapan radioaktivitas di dalam tubuh. Penyebaran tangkapan radiofarmaka terhadap dosis yang diberikan dalam tubuh untuk masing-masing pasien hipertiroid ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 1 Persentase *uptake* pasien hipertiroid

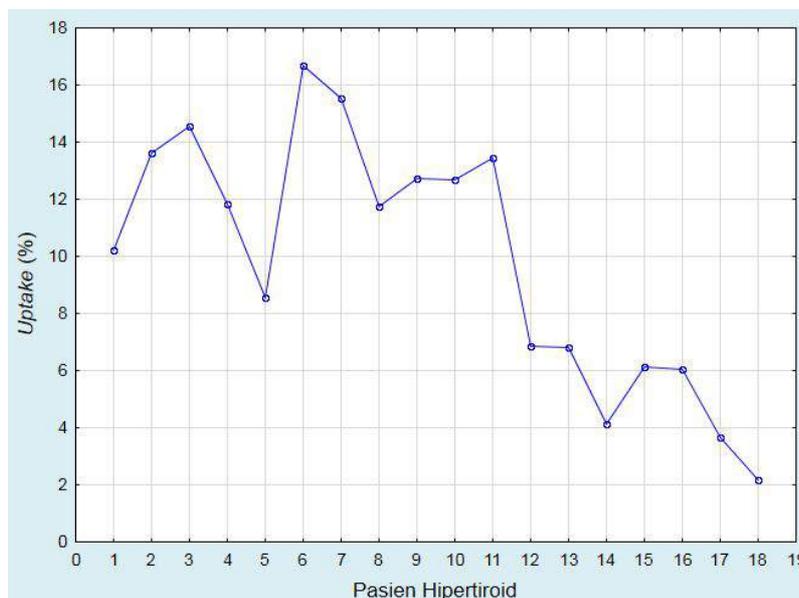
No	Inisial Pasien	Umur (tahun)	T3 (nmol/l)	T4 (nmol/l)	TSH (μ IU/ml)	<i>Uptake</i> (%)	Diagnosis dokter
1	SW	45	3,17	170,30	0,24	10,22	Toksik
2	IF	41	3,69	183,80	0,12	13,60	Toksik
3	HN	39	3,80	184,60	0,10	14,56	Toksik
4	MP	54	3,37	172,820	0,21	11,83	Toksik
5	FA	21	3,10	170,20	0,25	8,54	Toksik
6	YK	31	3,90	196,42	0,05	16,67	Toksik
7	YV	50	3,86	185,62	0,06	15,55	Toksik
8	DV	34	3,35	172,90	0,22	11,76	Toksik
9	SA	52	3,40	177,70	0,15	12,71	Toksik
10	AA	49	3,38	175,40	0,19	12,68	Toksik
11	GL	39	3,54	181,57	0,13	13,43	Toksik
12	RN	21	3,05	170,00	0,54	6,85	non toksik
13	ST	35	1,92	98,02	0,82	6,83	non toksik
14	TY	63	1,42	67,9	1,58	4,12	non toksik
15	LF	43	2,65	82,33	0,96	6,13	non toksik
16	MU	58	1,87	72,30	1,28	6,05	non toksik
17	NH	34	1,34	53,60	1,68	3,67	non toksik
18	NA	41	1,15	42,00	2,76	2,19	non toksik
Rata-rata		41,67	2,88	142,13	0,63	9,85	
Minimum		21	1,15	92,00	0,05	2,19	
Maksimum		63	3,90	196,42	2,76	16,67	

Menurut Mettler dan Guiberteau (1986), batas normal angka penangkapan tiroid terhadap radiofarmaka Tc^{99m} perteknetat adalah (1,6-7,6) %. Dari hasil penelitian secara keseluruhan diperoleh nilai *uptake* yang sangat tinggi untuk pasien hipertiroid toksik dibandingkan dengan batas normal angka penangkapan radiofarmaka oleh kelenjar tiroid, sehingga perlu dilakukan penanganan yang lebih lanjut oleh dokter.

Nilai persentase *uptake* yang tinggi menunjukkan keadaan tiroid yang sudah tidak berfungsi sesuai dengan fungsi normalnya yang diakibatkan karena tiroid yang bersifat hiperfungsi dalam memproduksi hormon tiroid. Sedangkan untuk pasien hipertiroid non toksik masih berada dalam batas *uptake* normal yaitu tiroid masing-masing pasien masih memproduksi hormon tiroid secara normal, sehingga tidak perlu penanganan yang lebih lanjut lagi oleh dokter.

Dari Tabel 1 dapat dilihat secara keseluruhan rerata nilai hormon T3 yaitu 2,88 nmol/l, hormon T4 yaitu 142,13 nmol/l dan nilai hormon TSH yaitu 0,63 μ IU/ml. Gerber (2003) menyatakan kadar T3 normal dalam tubuh berkisar antara (1,00-3,00) nmol/l, kadar T4 normal (55-170) nmol/l dan kadar TSH normal (0,27-3,75) μ IU/ml. Untuk pasien (1 hingga 11) yaitu pasien hipertiroid toksik nilai T3, T4 berada di atas batas normal dengan nilai maksimum secara berurutan yaitu 3,90 nmol/l dan 196,42 nmol/l sedangkan untuk nilai TSH nilai minimum yaitu 0,05 μ IU/ml. Pada pasien (12

hingga 18) yaitu pasien hipertiroid non toksik masih berada dalam batas normal untuk nilai hormon T3, T4 dan TSH. Hasil pemeriksaan dengan teknik *in vivo* (*uptake*) dan teknik *in vitro* (hormon T3) memberikan hasil yang tidak jauh berbeda, sehingga dapat digunakan untuk diagnosis kelainan kelenjar tiroid pada kedokteran nuklir.



Gambar 1 Pola *uptake* tiroid pada kelenjar tiroid

IV. KESIMPULAN

Uptake tiroid pasien hipertiroid toksik berada di atas batas normal angka penangkapan tiroid yaitu (8,54-16,67) % dan membutuhkan penanganan lebih lanjut terhadap kelainan fungsi tiroidnya. *Uptake* tiroid pasien hipertiroid non toksik masih berada dalam batas *uptake* normal yaitu (2,19-6,85) %. Persentase *uptake* terhadap hasil uji hormon memiliki hubungan yang sangat kuat, yang berarti bahwa kedua teknik *in vivo* dan *in vitro* dapat digunakan untuk mendiagnosis kelainan kelenjar tiroid dalam kedokteran nuklir.

DAFTAR PUSTAKA

- Bushberg, J.T., 2002, *The Essential Physics of Medical Imaging*, Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia.
- Garber, J.R., 2003, *The Harvard Medical School Guide to Overcoming Thyroid Problem*, United States of America.
- Mettler, F.A., dan Guiberteau, M.J., 1986, *Essentials of Nuclear Medicine*, Second Edition, W.B Saunders Company, Philadelphia.
- Schwartz, M.W., 1995, *Clinical Handbook of Pediatrics*, William and Wilkins 428, United States of America.
- Sukandar, E., 1982, *Bunga Rampai Ilmu Kedokteran*, Alumni, Bandung.

PERHITUNGAN NILAI KISI KRISTAL HEXAGONAL BERDASARKAN POLA DIFRAKSI SINAR-X MENGGUNAKAN SUB ROUTINE BISECTION

Erwin⁽¹⁾, Defrianto⁽¹⁾, Adhy Pryayitno⁽²⁾, Fikri Aldi⁽¹⁾

⁽¹⁾Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Riau

⁽²⁾Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Riau

Kampus Bina Widya Pekanbaru, 28293, Indonesia

Email: erwin_amiruddin@yahoo.com

ABSTRAK

Penelitian tentang komputasi terhadap parameter-parameter kisi kristal dengan struktur hexagonal melibatkan computer telah dilakukan. Dalam penelitian ini dibuat 2 buah program komputer yaitu program menu dan program utama ditulis menggunakan software (MatLab) versi 8.3.0.532 (R2014a). Program menu digunakan untuk menginput parameter-parameter yang diperlukan dalam perhitungan parameter kisi kristal hexagonal. Program kedua yaitu program utama, digunakan untuk menentukan parameter kisi kristal hexagonal (a dan c). Pola difraksi sinar-X yang digunakan dalam penelitian ini adalah pola difraksi sinar-X dari elemen cobalt. Dari pola difraksi ini ditentukan sudut 2θ , kemudian data ini diinputkan kedalam program menu. Data yang telah diinputkan kedalam program menu ini selanjutnya akan dimanfaatkan oleh program utama untuk melakukan perhitungan terhadap jarak antar bidang d_{hkl} . Kemudian, program komputer akan menghitung nilai batas atas dan bawah dari parameter kisi a dan c untuk seluruh bidang yang mungkin muncul dalam sistem kristal. Selanjutnya, dengan menggunakan metode bisection maka computer akan menghitung nilai a dan c berdasarkan hasil metode bisection dan akhirnya dipilih nilai a dan c yang sama atau hampir sama untuk indeks Miller yang berbeda. Hasil perhitungan parameter kisi a dan c untuk elemen cobalt adalah $a = 2.5032 \text{ \AA}$ dan c adalah 4.0602 \AA dan hasil perhitungan ini sesuai dengan yang diharapkan.

Kata kunci: Sinar-X, pola difraksi, struktur hexagonal, parameter kisi dan subroutine bisection

ABSTRACT

Numerical computation of lattice parameters of crystal with hexagonal structure has been performed using computer. In this research, two computer programs have been written using a software called MATLAB version R2014a. The first program called Program Menu is used to write the input data from the user. The second program called Main Program is used to determine the hexagonal parameters (a and c). The X-ray diffraction data was obtained from cobalt element. From X-Ray diffraction pattern of cobalt element, it can be obtained the angle of reflected beam (2θ). The Main program will calculate the upper and lower limit of lattice parameters for all possible planes in the unit cell of the crystal. Next, computer will calculate the value of lattice parameters of hexagonal structure of crystal. Finally, computer will select the value of lattice parameters (a and c) that has the same values for different crystal planes (hkl). The result of the lattice parameter's average of cobalt are $a = 2.5032 \text{ \AA}$ and $c = 4.0602 \text{ \AA}$. In this result, the values of lattice parameters are comparable with the values of lattice parameters in literature and this result can be accepted.

Keywords: X-Ray, diffraction pattern, hexagonal structure, lattice parameters and bisection subroutine

I. PENDAHULUAN

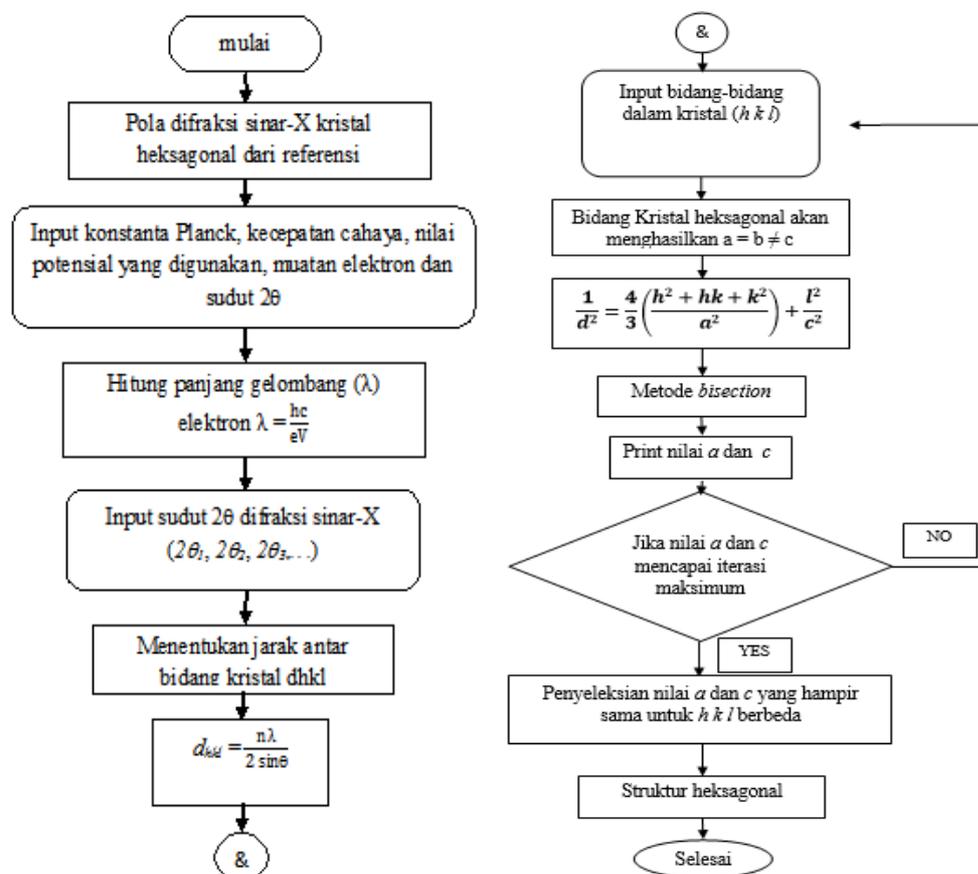
Media penyimpan data secara magnetic pada saat ini terus mengalami improvisasi terutama dalam kapasitas penyimpanan data. Salah satu upaya peningkatan kapasitas dari media ini diantaranya penggunaan bahan dasar cobalt, (Coey, 2010 dan Cullity, 2009) dalam bentuk lapisan tipis. Penggunaan cobalt sebagai bahan dasar media penyimpan data ini disebabkan karna sifat magnetic dari campuran cobalt dengan bahan non magnetic seperti samarium dalam bentuk lapisan ultra tipis dengan ketebalan beberapa nanometer memiliki sifat magnetic yang berbeda dibandingkan dengan material yang sama tetapi dalam bentuk bulk. Sebagai akkibat dari ini maka sifat magnetic dari lapisan tipis ini sangat sensitive terhadap struktur dan mikrostrukturnya. Struktur dari lapisan tipis ini dapat menampilkan dua sifat penting seperti sifat extrinsic dan intrinsic. Sifat extrinsic dari lapisan tipis adalah seperti magnetocrystalline anisotropy terinduksi dan coercivity sedangkan sifat instrinsiknya adalah seperti magnetisasi.

Satu aplikasi penting dari lapisan tipis ini, khususnya lapisan campuran yang material dasarnya seperti cobalt adalah sebagai media penyimpan data magnetik berkapasitas tinggi. Menurut Doerner, (2000) media penyimpan data magnetic longitudinal yang berkapasitas tinggi dengan nois yang kecil memerlukan material yang memiliki butiran magnetic yang kecil yaitu <math>< 10\text{ nm}</math>

Struktur campuran (alloy) yang bahan dasarnya cobalt seperti SmCo, (Wang, 2007 dan Cui, 2010) Co₅Pr, Co₅Sm dan nanoflake (Shen, 2010, Cui, 2011 dan Knutson, 2011). dapat ditentukan berdasarkan pola difraksi baik itu pola difraksi sinar x ataupun difraksi elektron. Untuk pola difraksi sinar-x, dengan puncak-puncak pola difraksi tertentu, maka perhitungan terhadap jarak antar bidang dalam kristal dengan menggunakan hukum Bragg dapat dilakukan, kemudian untuk menentukan struktur dari material tersebut biasanya peneliti membandingkan hasilnya dengan data American Standard for Testing Material (ASTM) atau struktur data base untuk material. Alternatif lain untuk menentukan struktur dari kristal dapat dilakukan dengan membuat program komputer untuk melakukan perhitungan terhadap parameter kisi kristal secara khusus dan struktur kristal suatu material secara umum. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan perhitungan numeris melalui pembuatan program komputer untuk menentukan parameter kisi kristal berbasis hexagonal berdasarkan hasil difraksi sinar-X dengan menggunakan metode *bisection*.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Untuk menentukan nilai parameter kisi kristal berstruktur hexagonal, maka dibuat 2 buah program komputer yaitu program menu dan program utama dengan menggunakan software (MatLab) versi 8.3.0.532 (R2014a). Langkah pertama adalah pembuatan program menu yang merupakan program untuk menginput data yang diperlukan dalam perhitungan parameter kisi dari material dengan struktur hexagonal. Keluaran dari program utama ini berupa file yang namanya adalah *datafile*. Tahap berikutnya dilakukan pembuatan program utama. Program ini digunakan untuk melakukan perhitungan terhadap struktur kristal dengan memanfaatkan data yang telah diinputkan melalui *datafile*.



Gambar 1. Diagram alir program komputer untuk untuk menentukan kisi kristal berstruktur hexagonal

Dalam program utama dilakukan perhitungan terhadap bidang kristal dengan menggunakan pola difraksi sinar-x dari cobalt. Untuk difraksi sinar-x, sudut-sudut hamburan sinar-x konstruktif dapat ditentukan dari pola difraksi yang dihasilkan oleh XRD, panjang gelombang sinar-x dapat ditentukan dari jenis tabung sinar-x yang digunakan serta tegangan operasi dari XRD tersebut. Dengan data ini komputer akan melakukan perhitungan terhadap jarak antar bidang-bidang dalam kristal dan selanjutnya melakukan perhitungan terhadap parameter parameter kisi a dan c dengan menginput seluruh indek Millar yang mungkin muncul dalam kristal. Selanjutnya computer akan memilih nilai nilai a dan c yang sama atau hampr sama untuk setiap indek Miller yang berbeda. Gambar berikut ini menampilkan diagram alir perhitungan parameter kisi kristal berstruktur hexagonal.

III. HASIL DAN DISKUSI

Hasil penelitian ini berupa dua buah program komputer yang ditulis menggunakan *software* Matrix Laboratory (MatLab versi 8.3.0.532 R2014a) Dua program komputer tersebut adalah program menu dan program utama, program ini ditulis untuk menghitung parameter kisi kristal berstruktur hexagonal berdasarkan pola difraksi sinar-X dengan menggunakan metode *bisection*.

3.1 Program Menu

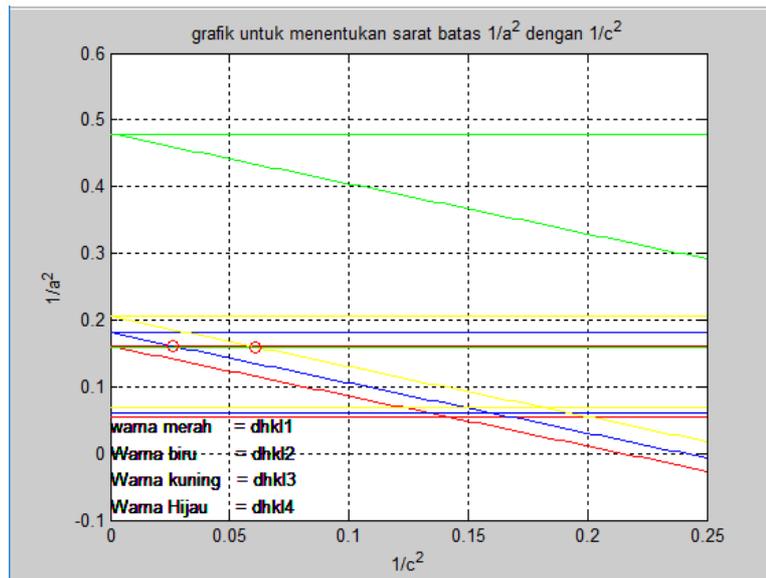
Program menu merupakan visualisasi yang dibuat dengan menggunakan perangkat lunak Matrix Laboratory (MatLab versi 8.3.0.532 R2014a), berfungsi untuk perekaman data yang diinput oleh pengguna (*user*). Data yang diinput dan direkam dalam program menu selanjutnya digunakan oleh program utama untuk menghitung parameter kisi kristal cobalt berstruktur hexagonal. Dalam program menu ini ditampilkan batas awal dan batas akhir parameter c untuk melakukan perhitungan menggunakan metode *subroutine bisection* (Giordano dkk., 2012) dan (Landau dkk., 2012). Tampilan dari program menu dapat dilihat pada Gambar 2 dibawah ini.



Gambar 2 Tampilan program menu perhitungan parameter kisi kristal cobalt berstruktur hexagonal

3.2 Program Utama

Perhitungan yang dilakukan oleh program utama menggunakan data yang telah di input pada program menu seperti ditunjukkan pada Gambar 2 diatas. Langkah pertama yang dilakukan oleh program utama adalah melakukan perhitungan terhadap panjang gelombang. Selanjutnya program utama akan melakukan perhitungan terhadap jarak antar bidang dalam kristal yang disimbolkan dengan d_{hkl} , program utama akhirnya akan melakukan perhitungan dan iterasi terhadap parameter kisi a dan c untuk kristal heksagonal yang dalam penelitian ini adalah cobalt. Dalam program utama, perhitungan yang dilakukan yaitu menghitung nilai panjang gelombang (λ) dan jarak antara bidang (d_{hkl}), kemudian dengan menggunakan program utama didapatkan nilai $h k l$ dari masing masing sudut difraksi (2θ) untuk elemen cobalt (Co) berdasarkan nilai parameter kisi a dan c yang hampir sama.



Gambar 3 Keluaran dari program utama untuk menentukan syarat batas parameter kisi a dan c .

Dalam melakukan perhitungan terhadap parameter kisi kristal a dan c seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, maka langkah awal yang dilakukan oleh program utama adalah menentukan syarat batas dari nilai parameter kisi a dan c dengan menggunakan metode *subroutine graph*. Hasil perhitungan ini ditampilkan pada Gambar 3. Nilai batas parameter kisi a dan c ini merupakan batasan yang digunakan agar komputer dapat melakukan perhitungan terhadap parameter a dan c menggunakan metode biseksi (*bisection method*).

Tabel 1 Hasil seleksi nilai nilai bidang hkl untuk perhitungan parameter a dan c dari elemen cobalt untuk sudut difraksi $2\theta_1, 2\theta_2, 2\theta_3$ dan $2\theta_4$.

Nilai bidang hkl yang memungkinkan pada $2\theta_1 = 41.8^\circ$		
h	k	l
0	0	0
0	0	1
0	0	2
0	1	0
0	1	1
0	1	2
0	2	0
0	2	1
0	2	2
1	0	0
1	0	1
1	0	2
1	1	0
1	1	1
1	1	2
1	2	0
1	2	1
1	2	2
2	0	0
2	0	1
2	0	2
2	1	0
2	1	1
2	1	2
2	2	0
2	2	1
2	2	2

hasil seleksi bidang hkl untuk nilai a dan c yang hampir sama				
h	k	l	a	c
0	1	0	2.4933	4.0441
1	0	0	2.4933	4.0441

Nilai bidang hkl yang memungkinkan pada $2\theta_2 = 44.4^\circ$		
h	k	l
0	0	0
0	0	1
0	0	2
0	1	0
0	1	1
0	1	2
0	2	0
0	2	1
0	2	2
1	0	0
1	0	1
1	0	2
1	1	0
1	1	1
1	1	2
1	2	0
1	2	1
1	2	2
2	0	0
2	0	1
2	0	2
2	1	0
2	1	1
2	1	2
2	2	0
2	2	1
2	2	2

hasil seleksi bidang hkl untuk nilai a dan c yang hampir sama				
h	k	l	a	c
0	0	2	2.5137	4.0773

Nilai bidang hkl yang memungkinkan pada $2\theta_3 = 47.5^\circ$			Nilai bidang hkl yang memungkinkan pada $2\theta_3 = 47.5^\circ$		
h	k	l	h	k	l
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1
0	0	2	0	0	2
0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	1	1
0	1	2	0	1	2
0	2	0	0	2	0
0	2	1	0	2	1
0	2	2	0	2	2
1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	0	1
1	0	2	1	0	2
1	1	0	1	1	0
1	1	1	1	1	1
1	1	2	1	1	2
1	2	0	1	2	0
1	2	1	1	2	1
1	2	2	1	2	2
2	0	0	2	0	0
2	0	1	2	0	1
2	0	2	2	0	2
2	1	0	2	1	0
2	1	1	2	1	1
2	1	2	2	1	2
2	2	0	2	2	0
2	2	1	2	2	1
2	2	2	2	2	2

hasil seleksi bidang hkl untuk nilai a dan c yang hampir sama				
h	k	l	a	c
0	1	1	2.5035	4.0607
1	0	1	2.5035	4.0607

hasil seleksi bidang hkl untuk nilai a dan c yang hampir sama				
h	k	l	a	c
0	1	1	2.5035	4.0607
1	0	1	2.5035	4.0607

Keluaran dari program ini berupa titik potong antara dua nilai hkl yang berbeda, titik potong tersebut diambil dari garis merah dan biru yang bersinggungan dengan garis hijau dan kuning yang bersinggungan, kemudian pertemuan titik potong antara dua garis yang bersinggungan dengan nilai hkl yang berbeda tersebut akan menjadi sarat batas sebagai syarat utama dilakukannya perhitungan nilai a dan c kristal hexagonal dengan menggunakan metode biseksi. Keluaran dari program utama berupa nilai hkl yang mungkin untuk mendapatkan nilai parameter kisi a dan c yang hampir sama dan hasilnya ditampilkan pada Tabel 1 dibawah ini.

Hasil iterasi parameter kisi a dan c kristal berstruktur hexagonal berdasarkan pola difraksi sinar-X dengan menggunakan metode *subroutine bisection* adalah sebagai berikut: untuk parameter kisi hexagonal a pada iterasi ke 1,2,3 dan 99 adalah masing masing 2.4981, 2.5007, 2.5019 dan 2.5032. Sedangkan untuk parameter kisi hexagonal c pada iterasi ke 1,2,3 dan 52 adalah masing masing 5.1232, 4.5916, 4.3259 dan 4.0602. Hasil keluaran dari iterasi yang dilakukan oleh program utama dengan jumlah iterasi lebih dari 50 dan menghasilkan nilai parameter kisi a dan c masing masing adalah 2.5032 Å dan 4.0602 Å. Nilai yang diperoleh ini hampir sama dengan nilai yang terdapat dalam referensi sistem basis data (Smith, 2004).

IV. KESIMPULAN

Dua buah program komputer menggunakan *software* Matrix Laboratory (MatLab) versi 8.3.0.532 (R2014a) untuk menentukan parameter kisi kristal hexagonal dan hkl dari elemen cobalt telah berhasil dibuat dan dijalankan (*run*). Hasil perhitungan parameter kisi hexagonal a dan c yang memiliki nilai hampir sama untuk hkl yang berbeda adalah $a = 2.5032$ Å dan $c = 4.0602$ Å dimana nilai parameter kisi a dan c yang diperoleh dengan menggunakan metode *suroutine bisection* sama dengan nilai rata-rata dari parameter kisi a dan c pada keempat indeks Miller (hkl). Perbandingan parameter kisi a dan c dengan nilai referensi menggunakan index reliabilitas yaitu $a = 0.151\%$ dan $c = 0.216\%$ artinya nilai a dan c yang diperoleh memiliki nilai yang hampir sama dengan nilai referensi yaitu $a = 2.5070$ Å dan $c = 4.0690$ Å.

DAFTAR PUSTAKA

- Coey, J.M. D., 2010, *Magnetism and Magnetic Materials* Cambridge University Press, Cambridge.
- Cui, B.Z., A. M. Gabay, W. F. Li, M. Marinescu, J. F. Liu, and G. C. Hadjipanayis, 2010, *J. Appl. Phys.* 107, 09A721.
- Cui, B.Z., W. F. Li, and G. C. Hadjipanayis, 2011, *Acta Mater.* 59(2), 563.
- Cullity, B.D. and Graham, C.D. 2009, *Introduction to Magnetic Materials*. 2nd Edition. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Doerner, M.F., K. Tang, T. Arnoldussen, H. Zeng, M.F. Toneyand, D. Weller, 2000, *IEEE Trans. Magn.*, 36, 43.
- Giordano, N.J. and H Nakanishi, 2012, *Computational Physics Using MATLAB*, Kevin Berwick West Lafayette, Indiana, USA.
- Knutson, S.J., Y. Shen, J. C. Horwath, P. Barnes, and C. H Chen, 2011, *J. Appl. Phys.* 109, 07A762.
- Landau, R.H., M. J. Paez, C. C. Bordeianu, 2012, *Computational Physics Problem Solving with Computers*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Shen, Y., M. Q. Huang, A. K. Higgins, S. Liu, J. C. Horwath, and C. H. Chen, 2010, *J. Appl. Phys.* 107, 09 A 722.
- Smith, W.F. 2004. *Foundation of Material Science and Engineering*. McGraw-Hill Higher Education: University of Central Florida.
- Wang, Y., Y. Li, C. Rong, and J. P. Liu, 2007, *Nano Technology* 18, 465701.

ANALISIS DAN VISUALISASI GERAK TRIPLE PENDULUM NONLINIER MENGGUNAKAN MATHEMATICA 10

Russell, Tua Raja Simbolon, Mester Sitepu

Program Studi Fisika Teoritis Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas
Sumatera Utara

Jln. Bioteknologi No.1, Medan, Indonesia

email Penulis: rsslong@gmail.com

ABSTRAK

Telah dibuat program untuk simulasi dan animasi gerak *triple* pendulum nonlinier dengan perangkat lunak Wolfram Mathematica versi 10. Persamaan gerak *triple* pendulum diperoleh dari persamaan Euler-Lagrange. Agar sistem dapat menampilkan gejala *chaos* dengan jelas, maka persamaan dibuat dalam keadaan tanpa dimensi (*Dimensionless*) yaitu $m = l = g = 1$. Hasil persamaan diplot berupa grafik perbandingan posisi pendulum 1 dengan posisi pendulum 2, posisi pendulum 2 dengan posisi pendulum 3, dan diagram fasa tiap-tiap pendulum. Grafik – grafik ini dipakai untuk menganalisis sistem mulai dari keadaan periodik hingga keadaan *chaos*. Animasi dari sistem diberikan untuk memperjelas dimana keadaan *chaos* terjadi pada gerak pendulum. Dari pengujian dan eksplorasi terhadap dinamika gerak sistem dapat dikatakan bahwa program ini sudah baik untuk mempelajari karakteristik gejala *chaos*.

Kata Kunci: *Triple* Pendulum, Mathematica 10, *chaos*

ABSTRACT

The Program for simulation and animation of nonlinier *triple* pendulum motion have been done by Wolfram Mathematica software version 10. The *Triple* pendulum equation was derived from Euler-Lagrange equation. In order to display the *chaos* phenomenon clearly, hence the equation was made in dimensionless state i.e. $m = l = g = 1$. The result of the equation were plotted in graphics of the comparison of position pendulum 1 with pendulum 2, the comparison of position pendulum 2 with pendulum 3, and the phase diagram of each pendulum. These Graphics were used to observe the system from periodic to *chaos* state. The animation of these system were given in order to show *chaos* state in its motion clearly. From the experiment of this program and the exploration of dynamics in the system, it can be said that this program works well to learn *chaos*.

Keywords: *Triple* Pendulum, Mathematica 10, *chaos*

I. PENDAHULUAN

Berbagai gejala alam menampilkan tingkah laku yang rumit, tak dapat diprakirakan, dan tampak acak (*random*). Misalnya, aliran turbulen yang terjadi pada gelombang lautan dan perubahan musim. Karena tak ada hubungan yang jelas antara sebab dan akibat, maka gejala-gejala semacam ini dikatakan memiliki *chaos*. Deskripsi teoritik sering tidak mampu menguak gejala *chaos* ini. Seiring dengan adanya kemajuan teknologi, maka permasalahan ini dapat diselesaikan dengan penggunaan komputer digital. Grafik computer dengan resolusi tinggi memungkinkan para peneliti untuk menyelidiki gejala *chaos* yang terbentuk dari pola keluaran suatu sistem yang disimulasi.

Banyak cabang ilmu pengetahuan lain yang telah memperlihatkan gejala *chaos* seperti fisika, kimia (Setiawan, 1991), hukum (Rahajo, 2007), populasi binatang, irama sirkulasi darah dalam tubuh (sahid, 2003), ekologi, dan ekonomi (Situngkir dan Surya, 2010). Untuk ilmu pengetahuan mengenai mekanika, beberapa sistem yang sudah dilakukan untuk membuktikan perilaku *chaos* dengan program Wolfram Mathematica adalah pendulum sederhana (Rahayu, 2010) dan pendulum ganda (Panggabean, 2011). Dalam makalah ini, kami mendemonstrasikan *chaos* pada *triple* pendulum. *Triple* pendulum adalah pengembangan dari pendulum ganda sehingga sistem ini juga membuktikan gejala *chaos*. Pendulum ini berupa sistem mekanik yang tersusun atas tiga massa terikat oleh tiga buah tali yang dapat berayun bebas sebagai respon terhadap gaya gravitasi. Persamaan geraknya bisa diperoleh dari persamaan Euler-Lagrange yang hasilnya adalah sebagai berikut (Stroup, 2004):

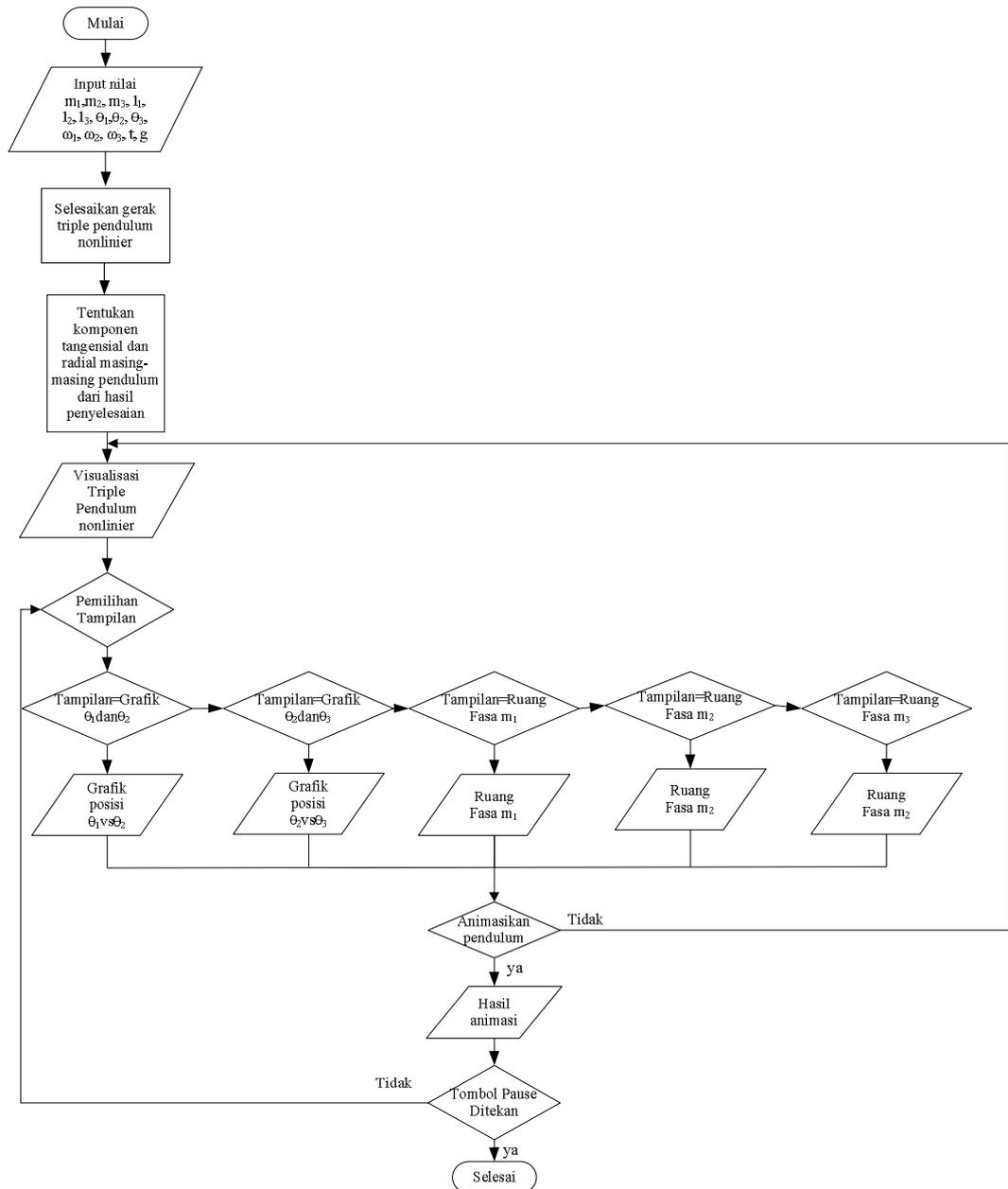
$$(m_1 + m_2 + m_3)l_1 \ddot{\theta}_1 + (m_2 + m_3)l_2 \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + m_3 l_3 \ddot{\theta}_3 \cos(\theta_1 - \theta_3) + (m_2 + m_3)l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + m_3 l_3 \dot{\theta}_3^2 \sin(\theta_1 - \theta_3) + (m_1 + m_2 + m_3)g \sin\theta_1 = 0 \quad (1)$$

$$(m_2 + m_3) l_1 \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) + (m_2 + m_3) l_2 \ddot{\theta}_2 + m_3 l_3 \ddot{\theta}_3 \cos(\theta_2 - \theta_3) - (m_2 + m_3) l_1 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + m_3 l_3 \dot{\theta}_3^2 \sin(\theta_2 - \theta_3) + (m_2 + m_3) g \sin \theta_2 = 0 \quad (2)$$

$$m_3 l_1 \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_3) + m_3 l_2 \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_2 - \theta_3) + m_3 l_3 \ddot{\theta}_3 - m_3 l_1 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_3) - m_3 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_2 - \theta_3) + m_3 g \sin \theta_3 = 0 \quad (3)$$

Berdasarkan ketiga persamaan gerak diatas, gerak *triple* pendulum akan disimulasikan dengan perangkat lunak Wolfram Mathematica 10. Digunakannya Mathematica versi 10 karena merupakan perangkat lunak untuk komputasi dengan kemampuan yang baik dalam perhitungan dan dapat memberikan tampilan GUI (*Graphic User Interface*) sehingga lebih mudah digunakan pengguna (Tam, 2008) Dengan simulasi ini diharapkan mampu memberi pemahaman yang jelas tentang perilaku *chaos*.

II. METODOLOGI



Gambar 1. Diagram alir simulasi dan animasi

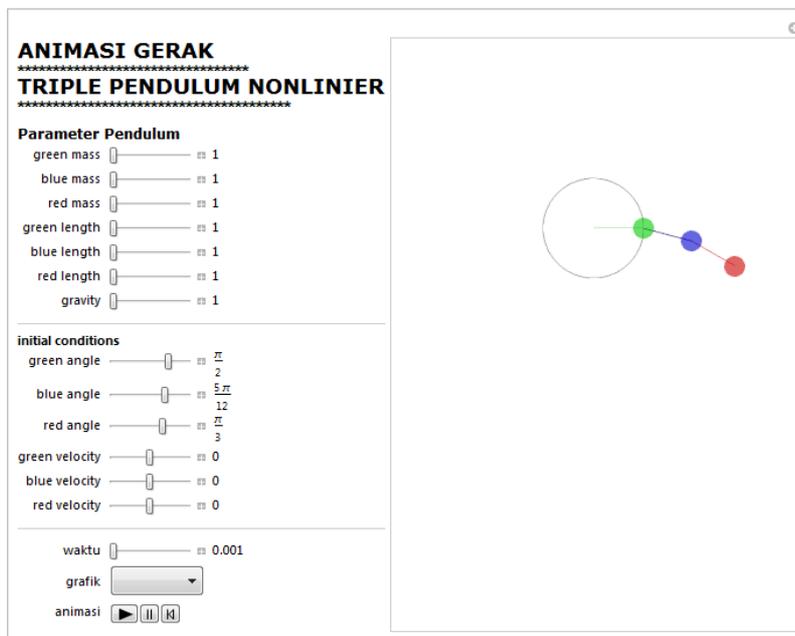
Simulasi gerak *triple* pendulum nonlinier akan dirancang dengan bahasa pemrograman Mathematica menggunakan seperangkat laptop berbasis sistem operasi *Microsoft Windows 7*. Perangkat kerasnya: prosesor AMD E-300 1.3 GHz, memori 2 Gb, dan tipe sistem 64-bit. Tempat penelitian dilakukan di laboratorium fisika komputasi Universitas Sumatera Utara.

Diagram alir simulasi dan animasi persamaan gerak *triple* pendulum nonlinier diperlihatkan pada gambar 1. Simulasi akan dimulai dengan memberikan data-data input terlebih dahulu. Data input pada simulasi yaitu, percepatan gravitasi g , massa masing - masing pendulum m_1, m_2 , dan m_3 , panjang tali masing – masing pendulum l_1, l_2 , dan l_3 , rentang waktu, t , dan syarat awal persamaan gerak pendulum θ (θ_1, θ_2 , dan θ_3) dan ω (ω_1, ω_2 dan ω_3). Setelah itu, program akan memvisualisasikan pendulum berdasarkan persamaan dan data yang diinput.

Selanjutnya, pengguna memilih grafik yang diinginkan di ditampilkan. Grafik yang dianalisis dalam simulasi ini adalah grafik θ_1 vs θ_2 , θ_2 vs θ_3 , ruang fasa m_1 , ruang fasa m_2 , dan ruang fasa m_3 . Terakhir, kita mengamati jejak lintasan dalam grafik dengan menekan tombol “animasi” pada setiap hasil eksekusi. Untuk membedakan gerak tiap pendulum, maka setiap pendulum akan diberi warna yang berbeda. pendulum 1 berwarna hijau, pendulum 2 berwarna biru, dan pendulum 3 berwarna merah. Agar sistem dapat menampilkan gejala *chaos* dengan jelas, maka ditentukan dalam keadaan tanpa dimensi (*Dimensionless*) yaitu $m = l = g = 1$ (Baker & Gollub, 1996), berdasarkan kan hal ini, maka ditetapkan $m_1 = m_2 = m_3 = l_1 = l_2 = l_3 = g = 1$. Nilai kecepatan sudut awal pendulum, ω_1, ω_2 , dan ω_3 pada program dapat divariasikan, tetapi dalam menganalisis *chaos* nilai ω ditetapkan 0 rad/s. Nilai θ_1 ditetapkan nilai $\pi/2$, sedangkan nilai θ_2 dan θ_3 boleh diubah-ubah. Rentang waktu dimulai dari $t = 0.001s - 100s$. Penentuan parameter-parameter seperti ini dimaksudkan agar keadaan-keadaan periodik, kuasiperiodik, dan *chaos* pada sistem dapat dianalisis dengan jelas.

III. HASIL DAN DISKUSI

Hasil eksekusi program simulasi adalah berupa grafik-grafik keluaran dari penyelesaian persamaan gerak *triple* pendulum yang terintegrasi pada suatu tampilan GUI (*Graphic User Interface*) seperti yang ditunjukkan gambar 2. Semua grafik ini akan digunakan untuk menganalisis waktu terjadinya peristiwa periodik, kuasiperiodik, dan *chaos*. Tampilan grafik pada hasil eksekusi program tersebut dapat diganti dengan mengubah menu tampilan yang berbentuk *Pop Up Menu*.

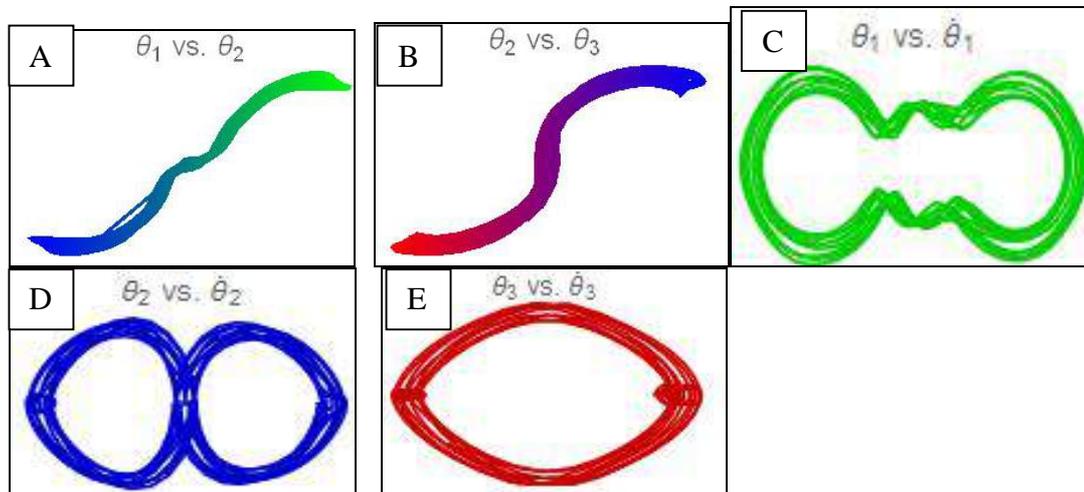


Gambar 2. Hasil eksekusi program pada Wolfram Mathematica

3.1 Keadaan Periodik

Keadaan periodik dari *triple* pendulum tercapai pada nilai θ_2 sekitar $5\pi/12$ dan θ_3 sekitar $\pi/3$. Hal ini dianalisis dari grafik keluaran yang ditunjukkan gambar 3. Pada gambar 3A, 3B, dan 3C menunjukkan keadaan *triple* pendulum yang bergerak sepanjang suatu lintasan pada bidang fasa sementara pendulum berayun. Karena adanya penurunan energi akibat pengaruh redaman dari masing-masing pendulum yang saling mempengaruhi sehingga lintasan pada keadaan transien terpilih

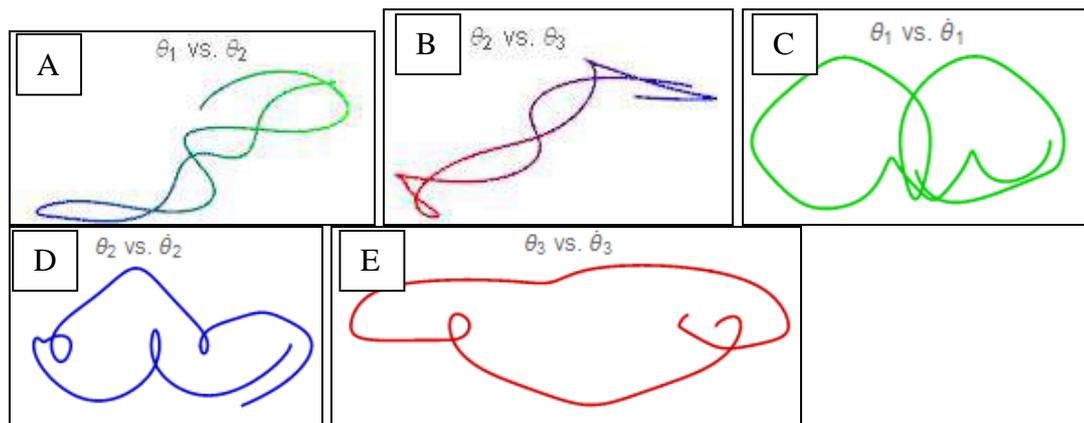
ke pusat bidang. Selanjutnya efek redaman diantisipasi oleh energi yang diserap oleh pengaruh redaman sehingga keadaan menjadi tunak dengan bentuk lintasan tertutup. Lintasan tertutup ini menandakan bahwa pendulum bersifat periodik, dengan keadaan akhirnya datang dengan keadaan awalnya.



Gambar 3. Grafik-grafik pada keadaan periodik: (A) θ_1 vs θ_2 , (B) θ_2 vs θ_3 , (C) Ruang fasa m_1 , (D) Ruang fasa m_2 , dan (E) Ruang fasa m_3

3.2 Keadaan Kuasiperiodik

Keadaan ini adalah keadaan dimana suatu sistem dinamis mengalami penggandaan periode. Keadaan ini merupakan jalan ke arah terjadinya *chaos*, dimana *chaos* itu sendiri terjadi bila suatu sistem mengalami penggandaan periode beberapa periode beberapa kali. Pada penelitian ini, keadaan kuasiperiodik terjadi apabila sudut θ_2 dan θ_3 diubah dari sudut periodik. Hasil paling jelas dicapai pada nilai θ_2 sekitar $5\pi/8$ dan θ_3 sekitar $10\pi/23$ dengan rentang waktu 1s-13s. Hal ini dianalisis dari grafik keluaran yang ditunjukkan gambar 4. Gambar 4C, 4D, dan 4E memperlihatkan bahwa lintasan tidak bergerak lagi dengan lintasan tertutup. Lintasan pada keadaan transien tertarik ke satu titik pada ruang fasa, tapi karena amplitudo pendulum cukup besar maka energi yang diserap pendulum pun cukup besar. Energi ini mengantisipasi redaman juga menyebabkan perubahan keadaan yang drastis dari pendulum, hal ini menyebabkan pecahnya orbit awal sehingga lintasan bergerak dengan dua periode yang berbeda atau penggandaan periode.

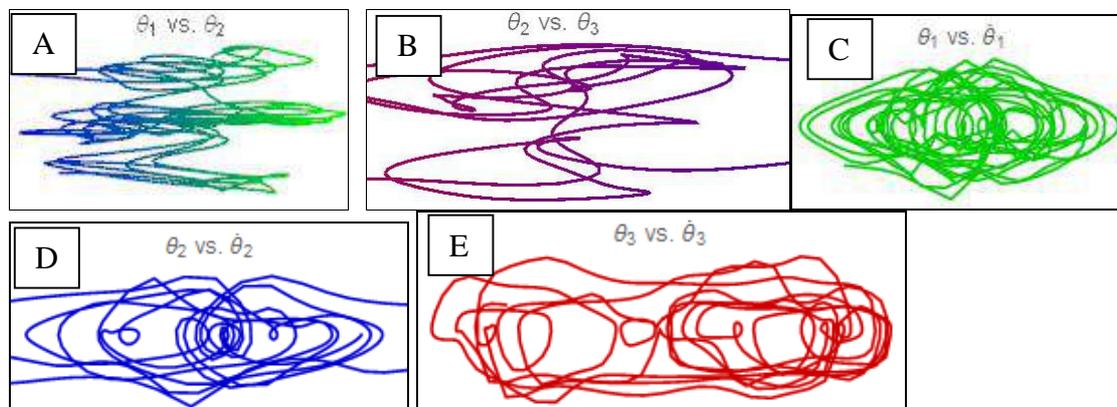


Gambar 4. Grafik-grafik pada keadaan kuasiperiodik: (A) θ_1 vs θ_2 , (B) θ_2 vs θ_3 , (C) Ruang fasa m_1 , (D) Ruang fasa m_2 , dan (E) Ruang fasa m_3

3.3 Keadaan Chaos

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa keadaan *chaos* terjadi bila suatu sistem mengalami penggandaan periode beberapa kali. Pada penelitian ini, kondisi *chaos* paling jelas terjadi pada sudut yang sama dengan keadaan kuasiperiodik dengan rentang waktu 1s – 90 s. Semua grafik pada gambar 5 sangat kompleks. Ruang fasanya berbeda dengan ruang fasa pada keadaan kuasiperiodik yang masih dapat ditinjau lintasan-lintasannya. Lintasan-lintasan pada ruang fasa ini

menjadi sulit untuk diidentifikasi karena geometri lintasan yang kompleks. Hal ini disebabkan energi yang besar dari pendulum menyebabkan ketidaklinearan dari sistem dan menyebabkan lintasan pecah dan kemudian pecah lagi menjadi beberapa lintasan, begitu seterusnya.



Gambar 5. Grafik-grafik pada keadaan *chaos*: (A) θ_1 vs θ_2 , (B) θ_2 vs θ_3 , (C) Ruang fasa m_1 , (D) Ruang fasa m_2 , dan (E) Ruang fasa m_3

IV. KESIMPULAN

Hasil animasi *triple* pendulum menggunakan bahasa pemrograman Mathematica ternyata menunjukkan bahwa sistem mekanika tersebut mempunyai karakteristik *chaos*, seperti pendulum ganda ataupun pendulum sederhana. Pada keadaan tanpa dimensi, gejala *chaos* muncul ketika nilai θ_2 dan θ_3 nya dinaikkan atau diturunkan sejauh dari sudut keadaan periodik dengan parameter yang lain dipertahankan konstan. keadaan *chaos* paling jelas terjadi pada sudut $\theta_2 = 5\pi/8$ dan $\theta_3 = 10\pi/23$ pada rentang waktu 1s-90s. Munculnya gejala *chaos* ini ditandai dengan grafik perbandingan posisi sudut yang tidak beraturan dan lintasan-lintasan pada ruang fasa yang membentuk suatu geometri yang kompleks setelah mengalami beberapa penggandaan perioda.

DAFTAR PUSTAKA

- Baker, G.L. and Gollub, J.P., 1996, *Chaotic Dynamics: An Introduction*, 2nd Edition, Cambridge University Press, United States of America.
- Panggabean, E.S., 2011, Analisis dan Visualisasi Gerak Pendulum Ganda Nonlinier, *Skripsi S-1*, Jurusan Fisika FMIPA USU.
- Rahaya, S.U., 2010, Analisis Kualitatif Gejala Chaos Pada Gerak Pendulum Sederhana Nonlinier Tere-dam dan Terkendali, *Skripsi S-1*, Jurusan Fisika FMIPA USU.
- Rahajo, A., 2007, Fenomena Chaos dalam Kehidupan Hukum Indonesia, *Jurnal Ilmu Hukum Syiar Madani*, 9:2, 142-160.
- Sahid, 2003, Teori Chaos (Chaos Theory): Dapatkah Gejala Alam dan Sosial Diprediksi dalam Jangka Panjang?, *Artikel Bidang Penelitian*, Jurusan Matematika FMIPA UNY.
- Setiawan, S., 1991, *Chaos: Gelora Sains Baru*, Edisi Pertama, Andi Offset, Yogyakarta.
- Situngkir, H. dan Surya, Y., 2010, Teori Chaos dan Bank Century, *Artikel Spesial*.
- Stroup, A., 2004, *The Dynamics of Pendula: An Introduction to Hamiltonian Systems and Chaos*, California Institute of Technology, California.
- Tam, P.T., 2008, *A Physicist's Guide to Mathematica*, Academic Press, United States of America.

MODEL DISTRIBUSI PANAS SALURAN GAS BUANGAN KENDARAAN UNTUK OPTIMALISASI ELEMEN PELTIER SEBAGAI GENERATOR TERMAL

Walfred Tambunan, Defrianto, Yanuar Hamzah, Lazuardi Umar

Jurusan Fisika FMIPA Universitas Riau, Pekanbaru

Kampus Bina Widya Sp. Baru 28293 Pekanbaru

email:walfred.tambunan@gmail.com

ABSTRAK

Model distribusi panas saluran buangan kendaraan bermotor telah dikembangkan untuk optimalisasi generator termoelektrik. Modul termoelektrik (*thermal electric modules, TEMs*) memanfaatkan efek Seebeck untuk membangkitkan listrik dari perbedaan gradien suhu, yang banyak dipergunakan bidang otomotif sebagai penghasil energi. Paper ini menyajikan suatu model matematis dipergunakan untuk mensimulasikan distribusi panas pada knalpot automotive dan untuk mereduksi kompling termal antara elemen Peltier dan sumber panas sesuai dengan bentuk dan geometri sumber dan serta elemen. Distribusi suhu pada model ditentukan dengan komputasi dimana model dibagi menjadi m pada arah sumbu x dan sumbu y pada arah n , menggunakan pemograman Matlab. Persamaan diskritisasi mensimulasikan distribusi suhu pada model generator termoelektrik pada nilai panjang penyangga aluminium $L_a = 5, 7.5, 10, 15$ dan 20 mm pada suhu sumber sebesar 120°C . Hasil model memperlihatkan variasi penurunan suhu dan dipergunakan untuk memilih lapisan pelapis dinding knalpot gas buangan untuk memastikan distribusi panas yang tepat dari TEM.

Kata kunci: model distribusi panas, otomotif, termoelektrik, efek Seebeck, modul TEM

ABSTRACT

A model of heat distribution for automotive muffler is developed to optimize the thermoelectric generator output. Thermoelectric modules (TEMs) use the Seebeck Effect to generate electricity from the temperature gradient difference, which is widely used in automotive application as an energy source. This paper presents a mathematical model for simulating the heat distribution of the muffler and then reducing the thermal coupling between Peltier element and a heat source depends on the shape and geometry of the heat source and the elements. The temperature distribution is determined by computing using Matlab programming whereby the model is divided into m in the x -axis and n in the y -axis. Discrete equations simulate the temperature distribution on the model of thermoelectric generator at different width of aluminum shielding $L_a = 5, 7.5, 10, 15$ and 20 mm at temperature source of 120°C . The model results showed a decrease in the temperature variations and it can be used for further experiment for selecting the layer coating of exhaust muffler to ensure proper distribution of heat on the TEM surface for optimum energy generating.

Keywords: Modeling, heat distribution, muffler, coupling, thermoelectric

I. PENDAHULUAN

Dekade belakangan ini sistem pembangkit energi mikro (*micro-energy harvesting systems*) merupakan garda terdepan dalam teknologi skala mikro yang menghasilkan milliwatts daya dari solar, vibrasi, thermal dan sumber biologis. Beberapa tahun yang lalu, pembangkit energi mikro (*micro-harvesting*) mengisi rasa keingin tahunan saintis (*scientific curiosity*). Namun saat ini teknologi berdaya rendah telah menyediakan pembangkit daya tenaga mikro dan menjadi bagian dari perancangan elektronik (Date, 2014; Redstall, 1995).

Saat ini pembangkit energi tenaga mikro tidak saja dipandang dari sisi konsumsi energi tetapi juga dari perspektif produksi. Memahami sumber energi dari sisi sumber lebih menantang dibandingkan dengan sisi konsumsi dikarenakan daya yang dihasilkan dari sumber ambang (*ambient sources*) cenderung tidak stabil, terputus dan berskala kecil. Beberapa aplikasi yang mempergunakan sumber energi mikro antara lain (Uemura, 1995, Xiaodong, 2008) perangkat medis terimplantasi dalam tubuh manusia, alat pendengaran (*in-ear device*) dan piranti permukaan kulit (*surface-of-skin device*).

Salah satu piranti yang menghasilkan energi dari panas adalah elemen Peltier. Pembangkit listrik termal ini (Generator Termoelektris, TEG) atau disebut juga elemen Seebeck berbentuk identik dengan elemen Peltier. Pada elemen dimanfaatkan efek Seebeck untuk membangkitkan energi listrik

jika terdapat perbedaan suhu pada elemen (Lovell, 1981). Efisiensi khas nya adalah sekitar 5-8%. Piranti Seebeck lama mempergunakan bimetallic junctions sementara piranti terbaru mempergunakan semiconductor p-n junctions terbuat dari bismuth telluride (Bi_2Te_3), lead telluride (PbTe), calcium manganese oxide, atau kombinasi keduanya (Eureka, 2010).

Elemen termal ini terdiri dari bahan semikonduktor kontak P-N yang terhubung secara seri. Kontak P-N ini terdoping secara berat yang berarti elemen memiliki tambahan khusus yang akan meningkatkan kelebihan atau kekurangan electron dan terhubung secara internal pada suatu elemen Peltier. Kontak P-N ini tersusun atas puluhan sampai ratusan elemen yang terpasang pada dua pelat yang membentuk suatu elemen Peltier, terhubung secara seri yang membentuk strip panjang P-N junctions. Pelat bagian atas adalah sisi panas, sementara bagian bawah adalah sisi dingin. Elemen ini adalah sandwiched antara dua pelat keramik yang memiliki konduktansi panas yang baik, namun disisi lain memperlihatkan tahanan listrik yang tinggi.

Pada penelitian ini, suatu model matematis dipergunakan untuk menentukan distribusi panas dari knalpot kendaraan bermotor untuk mereduksi panas yang dihasilkan sehingga cocok dengan unjuk kerja elemen Peltier. Model ini dikembangkan berdasarkan kopleng termal antara sumber panas dan permukaan elemen sehingga faktor tahanan panas dapat diminimalkan. Hasil model ini diberikan pada berbagai ketebalan dari penahan panas terbuat dari logam aluminium yang dapat dipergunakan untuk menyeleksi material perisai dari dinding termal knalpot sehingga memastikan distribusi panas pada sisi TEG dapat diatur. Hal ini memungkinkan untuk menghasilkan sisi panas dari knalpot yang tidak merusak permukaan TEG pada kondisi sesaat ketika gradien panas yang besar diberikan pada permukaan.

II. METODOLOGI

2.1 Parameter Element Peltier

Efek Seebeck menggambarkan induksi tegangan voltage V_S dalam suatu rangkaian yang terdiri dari dua material konduktif berbeda, dimana sambungannya memiliki suhu yang berbeda. Dalam kasus modul Peltier, tegangan Seebeck dapat dinyatakan dalam persamaan (1) dimana $T_h - T_c$ adalah gradient suhu yang menyeberangi junctions terletak pada sisi yang berlawanan dari module.

$$V_S = \oint E dx = \int_0^1 \dots + \int_1^2 \dots + \int_2^0 \dots = (K_A - K_B)(T_h - T_c) \quad (1)$$

$$V_S = \alpha(T_h - T_c)$$

Tingkat kemampuan elemen Peltier dalam mengubah energi panas menjadi listrik akan ditentukan oleh faktor efisiensi. Jumlah panas yang diserap atau didisipasikan bergantung pada arus listrik dan suhu absolut T . Daya termal yang proporsional dengan fenomena Peltier dapat dihitung sebagai:

$$Q_p = \pi I = \alpha T I \quad (2)$$

dimana I arus yang mengalir dalam module thermoelectric module, π adalah koefisien Peltier yang dapat dinyatakan dengan koefisien Seebeck α . Efek Peltier adalah dasar pembuatan thermoelectric coolers, sementara efek Seebeck effect dipergunakan untuk pembangkit daya listrik.

Fenomena Thomson akan hadir dengan adanya arus listrik yang mengalir pada suatu konduktor listrik homogen dari element dengan beda suhu. Tergantung pada arah arus maka, suatu panas diserap atau didisipasikan dari konduktor. Model kuantitatif yang menggambarkan ini dinyatakan oleh (Lovell et al, 1981):

$$Q_t = -\mu_T \cdot I \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

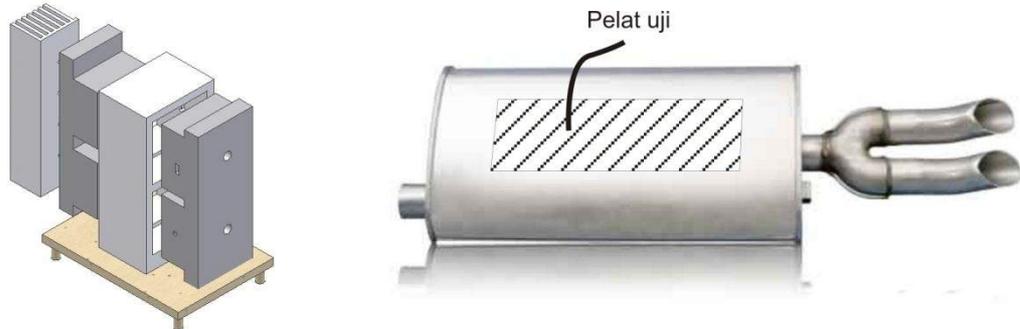
dimana μ_T merupakan koefisien Thomson. Sementara fenomena Joule merupakan fenomena yang berasosiasi dengan arus yang mengalir dalam rangkaian listrik. Efek Joule tidak memiliki efek reversible dan dinyatakan dalam suatu disipasi panas oleh material pada kondisi tahanan non-zero dan kondisi adanya arus listrik. Besarnya efek Joule digambarkan dalam persamaan berikut:

$$Q_j = I^2 \cdot R \quad (4)$$

Arus panas yang bergerak pada sisi konduktor ke dinding elemen Peltier akan dimodelkan menurut persamaan difusi berikut.

2.2 Pemodelan Distribusi Elemen Sumber Panas Terbuang

Distribusi fluks panas dihasilkan oleh sumber panas terbuang panas knalpot gas buangan kendaraan bermotor seperti Gambar 1 .

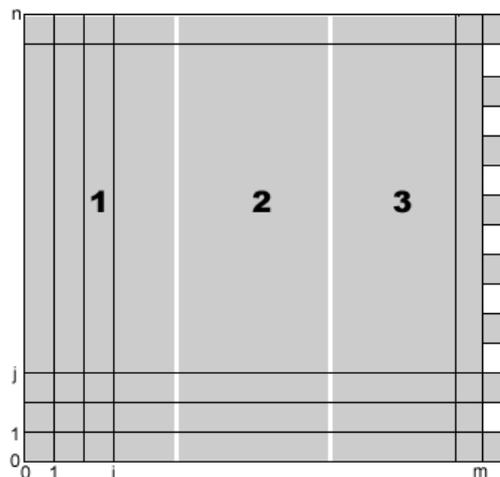


Gambar 1. Geometri dan susunan elemen panas untuk simulasi distribusi panas knalpot

Pemodelan distribusi panas yang datang pada permukaan elemen Peltier dinyatakan dalam suatu persamaan difusi, akan menggambarkan tingkat panas dari elemen sumber panas terbuang dan penetrasi panas dari sumber panas melalui plat adapter yang terbuat dari logam dengan geometri tertentu. Optimalisasi diperoleh dengan mengubah parameter persamaan difusi yaitu fungsi syarat batas serta bentuk geometri dari sumber panas.

2.3 Model Distribusi Suhu

Konversi panas menjadi energi listrik dapat dibagi menjadi tiga bagian seperti diperlihatkan pada Gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Bagian-bagian panas dari tiga elemen berbeda

Bagian pertama menyatakan sumber panas dari knalpot kendaraan bermotor yang merupakan energi panas terbuang, bagian kedua adalah elemen Peltier (TEG) dan bagian terakhir adalah pembuang panas (heat sink).

Distribusi suhu model diatas dapat ditentukan secara komputasi, maka model tersebut dibagi sebanyak m searah sumbu x dan sebanyak n searah sumbu y . Distribusi temperatur pada model Gambar 3 dirumuskan dalam persamaan diffusi berikut (Jaegle, 2008):

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = F(x, y, z, t) \quad (5)$$

dalam bentuk umum

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \nabla^2 T = F(x, y, z, t) \quad (6)$$

dimana F merupakan fungsi sumber panas, T adalah suhu sebagai fungsi (x, y, z dan t), koordinat x, y, z menggambarkan koordinat ruang, t adalah waktu dan α merupakan konduktivitas panas bahan. Pada keadaan steady, T tidak tergantung pada waktu maka persamaan di atas direduksi menjadi :

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \mu F(x, y, z) \quad (7)$$

Untuk menentukan distribusi temperatur $T(x, y, z)$ pada suatu domain persoalan secara komputasi menggunakan metode beda hingga maka persamaan ini harus didiskritisasi:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T(x+\Delta x, y, z) - 2T(x, y, z) + T(x-\Delta x, y, z)}{\Delta x^2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T(x, y+\Delta y, z) - 2T(x, y, z) + T(x, y-\Delta y, z)}{\Delta y^2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T(x, y, z+\Delta z) - 2T(x, y, z) + T(x, y, z-\Delta z)}{\Delta z^2} \quad (10)$$

dengan mengambil nilai $\Delta x = \Delta y = \Delta z = h$ maka distribusi suhu keadaan steady didiskritisasi disekitar titik (i, j) menjadi menjadi :

$$T_{i+1,j,k} + T_{i-1,j,k} + T_{i,j+1,k} + T_{i,j-1,k} + T_{i,j,k+1} + T_{i,j,k-1} - 6T_{i,j,k} = h\mu F_{i,j,k} \quad (11)$$

dengan memasukkan seluruh i dan j , maka akan diperoleh persamaan matrik :

$$A \cdot T = F \quad (12)$$

Maka distribusi temperatur T pada model konversi panas ke listrik untuk setiap titik (i, j) diperoleh dengan menyelesaikan persamaan matrik berikut :

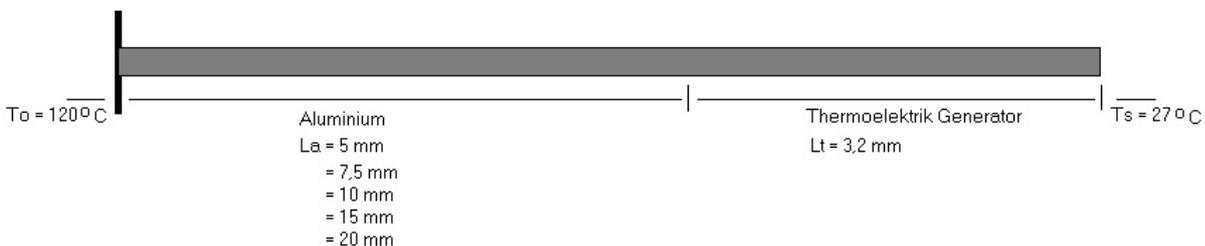
$$T = A^{-1}F \quad (13)$$

III. HASIL & DISKUSI

Pola distribusi temperatur pada generator termoelektrik dimodelkan secara matematis mempergunakan program komputer untuk mempelajari proses distribusi suhu pada pelat pemanas. Untuk tahap pertama, simulasi distribusi akan dibuat satu dimensi yang akan memberikan informasi tentang penetrasi panas di dalam pelat. Distribusi temperatur pada Thermoelektrik Generator seperti pada Gambar 3 dimodelkan oleh persamaan :

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + u(T - T_s) = 0 \quad (14)$$

dimana T adalah Temperatur, k adalah Konduktivitas panas, u merupakan koefisien transfer panas dan T_s adalah temperatur lingkungan.



Gambar 3. Generator elektrotermal

Diskritisasi persamaan (14) dengan menggunakan metode beda hingga memberikan:

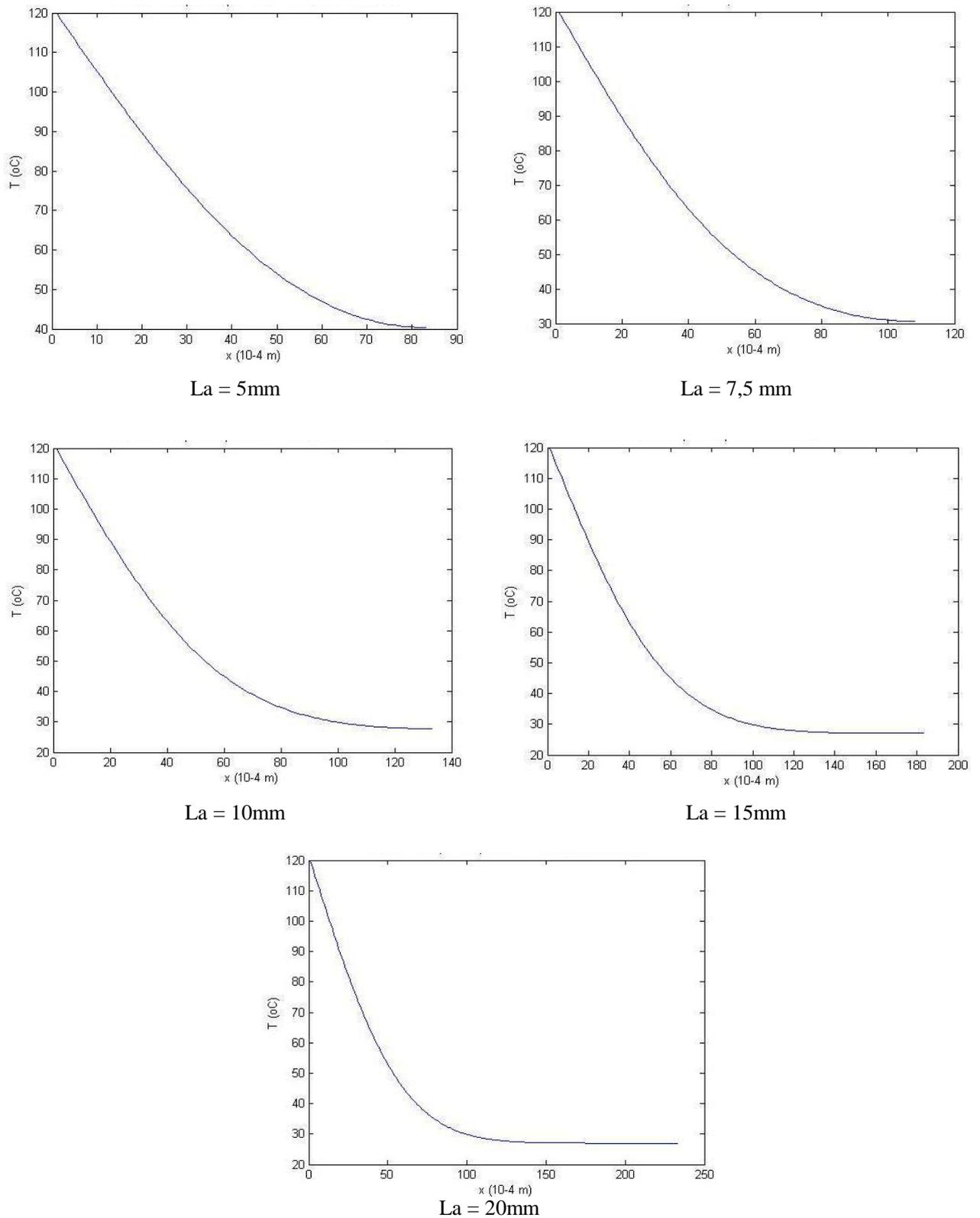
$$T_i = \left(\frac{1}{2+D} \right) (T_{i+1} + T_{i-1} + DT_s) \quad (15)$$

$$D = uh^2/k \quad (16)$$

h = diskritisasi jarak

Menggunakan pemograman Matlab, persamaan diskritisasi (15) dibuat program untuk mensimulasikan distribusi temperatur pada model generator termoelektrik.

Simulasi dijalankan untuk nilai panjang penyangga aluminium $La = 5, 7.5, 10, 15$ dan 20 mm. Hasil dari simulasi untuk menentukan distribusi suhu dari sumber panas terbangung (knalpot kendaraan bermotor) sampai kepada permukaan elemen Peltier yang melewati variasi ketebalan diperlihatkan seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Distribusi temperatur pada berbagai variasi ketebalan perisai aluminium

Hasil simulasi pada Gambar 4 memperlihatkan bahwa terjadi penurunan ke arah x sesuai dengan variasi ketebalan mulai dari sumber panas terbuang dengan suhu 120°C sampai dengan sisi panas elemen Peltier, dimana makin tipis pelat perisai panas maka suhu yang jatuh pada permukaan sisi dari TEG akan makin kecil. Dengan demikian dapat disimulasikan dan dimodifikasi persamaan difusi yang telah disebutkan di atas untuk variasi ketebalan perisai dan jenis material logam yang akan dipergunakan sehingga diperoleh distribusi optimal ke sisi permukaan dari elemen Peltier.

IV. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dikembangkan suatu model matematis yang dipergunakan untuk menggambarkan distribusi panas yang diberikan oleh elemen pemanas dari knalpot mobil. Pemberian panas dilakukan untuk mengatur panas yang diberikan sesuai dengan kemampuan teknis dari elemen generator thermal serta untuk mereduksi gap yang timbul antara elemen Peltier dan sisi panas dari knalpot sehingga akan diperoleh suhu yang optimal. Variasi ketebalan material perisai dan materialnya akan memberikan distribusi suhu yang sesuai dengan spesifikasi TEG untuk memperoleh energi listrik yang maksimum tanpa harus merusak akibat adanya gradien termal sesaat yang besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai oleh dana penelitian Hibah Bersaing tahun 2015 dari DP2M Direktorat Pendidikan Tinggi Kementerian Riset Teknologi Dikti Republik Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Date A. Date, A., Dixon C., Akbarzadeh A., 2014. Progress of thermoelectric power generation systems: Prospect for small to medium scale power generation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 33, 371–381.
- Eureka, 2010. Peltierelemente und Zubehör, EURECA Messtechnik GmbH, <http://www.eureca.de>.
- Lovell M. C., Avery A. J., Vernon M. W. 1982, *Physical properties of materials*, Van Nostrand Reinhold Company, University Press, Cambridge.
- Redstall R. M., Studd R. 1995, Reliability of Peltier Coolers in Fiber-Optic Laser Packages, *CRC Handbook of Thermoelectrics*, CRC Press 1995, 641-645.
- Uemura K., 1995, Laboratory Equipment, *CRC Handbook of Thermoelectrics*, CRC Press 1995, 647-655.
- Zhang X, Chau K. T. dan Chan C. C., 2008. Overview of Thermoelectric Generation for Hybrid Vehicles, *Journal of Asian Electric Vehicle*, Volume 6 No. 2, December 2008

KETERGANTUNGAN KARAKTERISTIK I-V MOLEKUL DNA POLYG-POLYC PADA FREKUENSI GETAR GERAK MEMUTAR PASANGAN BASA

Efta Yudiarsah

Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia, Depok, 16424

E-mail : e.yudiarsah@sci.ui.ac.id

ABSTRAK

Karakteristik I-V molekul DNA PolyG-PolyC telah dihitung. Perhitungan dilakukan pada model DNA untai ganda dengan panjang 32 pasangan basa yang diletakkan di antara dua elektrode metalik. Molekul DNA dan elektrode dimodelkan dengan Hamiltonian *Tight Binding*. Pengaruh gerak memutar pasangan basa pada energi *on-site* basa dan *backbone* gula-fosfat dilibatkan dalam model ini. Teori semiempiris Slater-Koster digunakan untuk melibatkan pengaruh gerak memutar pasangan basa pada konstanta loncatan elektron (*electron hopping constant*) antarbasa baik di untai yang sama (kopling *intra-strand*) maupun di untai yang berbeda (kopling *inter-strand*) dengan mempertahankan perbedaan posisi basa dari sumbu simetri DNA. Karakteristik I-V dihitung menggunakan formalisme Landauer-Büttiker dari probabilitas transmisi yang dihitung secara simultan menggunakan metode matriks transfer dan teknik matriks hamburan. Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa arus listrik langsung meningkat saat tegangan diatur lebih dari nol. Selain itu, frekuensi getar gerak memutar mempengaruhi besar arus listrik, semakin tinggi frekuensi semakin besar arus listrik.

Kata Kunci: model DNA, karakteristik I-V, frekuensi, formalisme Landauer-Büttiker, matriks transfer, matriks hamburan

ABSTRACT

The I-V characteristic of PolyG-PolyC DNA molecule has been calculated. The calculation was carried out on 32 bp double-stranded DNA model sandwiched between two metallic electrodes. Tight binding Hamiltonian was used in modeling the molecule and electrodes. The effect of twisting motion of base pair on on-site energies of bases and sugar-phosphate backbone is taken into account in the model. Semi-empirical theory of Slater-Koster is employed in bringing the effect of base pair twisting motion on electron hopping constants between bases, both intra-strand and inter-strand, by keeping the distance of bases to the symmetrical axis of DNA different. The I-V characteristic has been calculated within Landauer-Büttiker Formalism from transmission probability, which is calculated using transfer matrix method and scattering matrix technique simultaneously. The result shows that electrical current increases immediately after the voltage is on. In addition, twisting motion frequency influences the magnitude of the current, higher frequency results in higher current amplitude.

Keywords: DNA model, I-V characteristic, frequency, Landauer-Büttiker formalism, transfer matrix, scattering matrix

I. PENDAHULUAN

Kecenderungan memperkecil ukuran divais elektronik menimbulkan pertanyaan seberapa kecil devais elektronik berbahan dasar zat padat dapat dibuat. Kalau kecenderungan ini terus berlanjut, ukuran divais elektronik akan mencapai skala molekular bahkan atomik. Hal ini membuka peluang untuk mengembangkan devais elektronik dengan menggunakan molekul sebagai bahan aktifnya. Banyak molekul telah dicobakan sebagai bahan aktif divais elektronik, antara lain *Benzenedithiol* [Reed 2001], *thioacetylphenyl* [Zhou 1997], dan DNA [Braun 1998]. DNA diharapkan dapat digunakan sebagai pola dasar dalam pembuatan kawat dalam ukuran nanometer [Braun 1998]. Selain itu, DNA juga diharapkan menjadi komponen dasar di transistor molekular dan divais yang lain [Nokhrin 2007], seperti biosensor [Zappino 2014].

Sejak penelitian yang dilakukan oleh Eley dan Spivey [Eley 1992] yang memperlihatkan bahwa DNA dapat menghantarkan arus, penelitian tentang sifat transport DNA telah banyak dilakukan. Sayangnya, pengukuran konduktivitas listrik DNA yang dilakukan memberikan hasil yang beragam tentang sifat transport DNA, mulai dari isolator hingga ke *proximity-induced superconductor* [Pablo 2000, Porath 2000, Fink 1999, dan Kasumov 2001]. Banyak faktor yang mempengaruhi sifat transport DNA, antara lain DNA *sequence* [Jo 2003 dan Klotsa 2005], medium atau substrat [Roche

2003 dan Guo 2008], gerakan basa penyusun DNA karena pengaruh termal (vibrasi internal molekul) [Muren 2012 dan Jo 2003], dan ketidaksesuaian pasangan basa [Kratochvílová 2010].

Selain potensi untuk aplikasi pada teknologi elektronik molekular, ketertarikan fisikawan pada sifat transpor DNA juga timbul karena hantaran listrik pada DNA diduga terlibat di beberapa fenomena biologi seperti pendeteksian dan perbaikan kerusakan [Dandliker 1997 dan Boon 2003], mutasi DNA [Miller 2015] serta sistem sensor dan pensinyalan [Sontz 2012 dan Genereux 2010]. DNA merupakan molekul panjang dan fleksibel. Karena itu, gerakan osilasi memutar pasangan basa mungkin merupakan faktor penting yang menentukan sifat transpor molekul DNA.

Laporan ini akan dititikberatkan pada hasil penelitian tentang pengaruh gerak getaran memutar pada karakteristik I-V melekul DNA dengan sekuen PolyG-PolyC. Molekul yang menjadi objek penelitian ini mempunyai panjang 32 pasangan basa. Pengaruh *twisting* pada konstanta loncatan dilibatkan pada perhitungan menggunakan teori semi-empiris Slater-Koster [Endress 2004]. Metode matriks transfer dan matriks hamburan digunakan secara simultan dalam menghitung probabilitas transmisi sebagai fungsi energi elektron. Karakteristik I-V dihitung dari probabilitas transmisi menggunakan formalisme Landaur-Büttiker dengan mengasumsikan potensial jatuh secara simetri di kontak. Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa arus meningkat dari nol langsung saat tegangan dibuat tidak sama dengan nol. Kecenderungan ini teramati di semua frekuensi yang digunakan dalam perhitungan. Selain itu teramati bahwa getaran memutar dengan frekuensi yang tinggi menaikkan arus pada rentang tegangan yang digunakan. Semakin tinggi potensial, pengaruh frekuensi getar memutar semakin besar.

Laporan ini disusun dengan sistematika sebagai berikut: model molekul DNA dan parameter yang digunakan serta metode perhitungan yang dipakai dijelaskan di bagian berikut. Kemudian hasil perhitungan akan disikasikan di bagian hasil dan pembahasan. Laporan ini akan ditutup dengan kesimpulan pada bagian akhir.

II. METODOLOGI

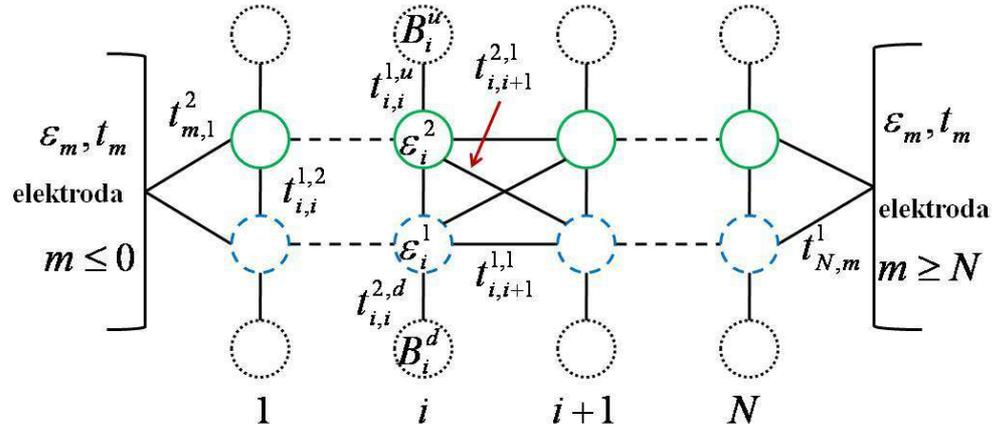
Model DNA Poly(dG)-Poly(dC)untai ganda yang dipelajari terdiri dari situs basa dan tulang punggung gula-fosfat yang dihubungkan dengan konstanta loncatan. Model planar DNA tersebut yang diletakkan di antara dua elektrode metal ditampilkan di gambar 1. DNA secara umum tersusun atas empat nukleobasa, tetapi pada laporan ini kami hanya menggunakan dua basa yaitu *Guanin* (G) dan *Citosin* (C). Pada model ini elektron dapat berpindah dari satu situs ke situs lain seperti dari satu basa ke tulang belakang gula-fosfat terdekat atau sebaliknya. Selain itu, elektron dapat pula berpindah antarbasa berdekatan baik di satu rantai maupun di rantai yang berbeda. Kemungkinan elektron berpindah dari satu situs ke situs yang lain dinyatakan dengan konstanta loncatan.

Model molekul DNA yang diteliti dinyatakan dengan Hamiltonian ikatan kuat (*tight binding*) berikut

$$H_{dna} = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 \left\{ \varepsilon_i^j c_{i,j}^+ c_{i,j} + t_{i,i}^{j,j+1} (c_{i,j}^+ c_{i,j+1} + c_{i,j+1}^+ c_{i,j}) \right\} + \\ \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j,k=1}^2 t_{i,i+1}^{j,k} (c_{i,j}^+ c_{i+1,k} + c_{i+1,k}^+ c_{i,j}) \\ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 \sum_{k=u,d} \left\{ B_i^k c_{i,k}^+ c_{i,k} + t_{i,i}^{j,k} (c_{i,j}^+ c_{i,k} + c_{i,k}^+ c_{i,j}) \right\} \end{array} \right\} \quad (1)$$

Suku pertama di persamaan (1) mewakili energi di basa dengan ε_i^j menyatakan energi di basapada situs ke- i di rantai ke- j . Suku kedua mewakili loncatan elektron antarbasa pada pasangan Watson-Crick dengan konstanta loncatan elektron $t_{i,i}^{1,2}$ dan $t_{i,i}^{2,1}$. Suku ketiga mewakili loncatan elektron antarbasa di satu rantai (*intra-strand*) dengan konstanta loncatan $t_{i,i+1}^{j,j}$. Suku ketiga juga mewakili loncatan eletron antarbasa di dua rantai yang berbeda (*inter-strand*); konstanta loncatan elektron dinyatakan dengan $t_{i,i+1}^{1,2}$ dan $t_{i,i+1}^{2,1}$. Suku keempat mewakili energi di situs tulang belakang gula-fosfat dengan parameter B_i^d dan B_i^u . Suku terakhir merupakan suku loncatan elektron dari satu

basa di rantai ke tulang punggung fosfat terdekat, diwakili dengan parameter $t_{i,i}^{1,d}$ dan $t_{i,i}^{2,u}$. Nilai N pada persamaan tadi menyatakan panjang untai DNA yang digunakan. Pada penelitian ini $N = 32$ pasangan basa.



Gambar 1. Skema diagram model molekul DNA Poly(dG)-Poly(dC) untai ganda yang diletakkan di antara dua elektrode metal. Lingkaran hitam (garis titik-titik) menggambarkan situs tulang belakang gula-fosfat; lingkaran hijau (garis penuh) and biru (garis putus-putus), masing-masing, menggambarkan nukleobasa guanin (G) and sitosin (C). Garis penghubung dua situs mewakili probabilitas lompatan elektron antarsitus.

Pengaruh gerak getaran memutar pasangan basa pada energi basa diwakili oleh persamaan [Kurnia Suhendro 2010]

$$\varepsilon_i^j = \phi_i^j + b_{i-1,1}^j (\cos \Delta_{i-1,i}^{j,j} - \cos \varphi_{eq}) + b_{i,1+1}^j (\cos \Delta_{i,i+1}^{j,j} - \cos \varphi_{eq})$$

dengan

$$\Delta_{i-1,i}^{j,k} = \varphi_{eq} - (\varphi_{i-1}^j - \varphi_i^k)$$

dan

$$\Delta_{i,i+1}^{j,k} = \varphi_{eq} - (\varphi_i^j - \varphi_{i+1}^k). \quad (2)$$

Pada persamaan (2) φ_i^j merupakan sudut putar basa diukur dari posisi keseimbangan. Gerak memutar ini disebabkan oleh fluktuasi termal [Roche 2003 dan Yu 2001], sehingga nilai φ_i^j dimodelkan mengikuti distribusi Gaussian dengan nilai rerata nol dan standar deviasi $\sqrt{k_b T / (I_n \omega^2)}$. T merupakan temperatur sistem, k_b adalah kostanta Boltzmann, I_n adalah momen inersia basa yang diasumsikan sama untuk semua basa dan diambil nilai dalam orde nilai teoritis yaitu $1,0 \times 10^{-44} \text{ kgm}^2$ [Yakushevich 2004], ω adalah frekuensi gerak memutar pasangan basa, dan φ_{eq} merupakan sudut putar yang dibentuk oleh dua pasangan basa berdekatan pada keseimbangan karena helisitas DNA. Pada laporan ini nilai φ_{eq} yang digunakan sebesar 30° . ϕ_i^j merupakan energi basa dalam keadaan seimbang yang bernilai 7.84 eV untuk basa G dan 8.85 eV untuk basa C. Parameter b merupakan konstanta kopling muatan dengan gerak memutar pasangan basa.

Selain mempengaruhi energibasa, gerak memutar juga mempengaruhi konstanta lompatan elektron antarbasa. Pelibatan fenomena ini di model Hamiltonian menggunakan teori semi-empiris Slater-Koster [Endress 2004]. Setelah dilakukan ekspansi diperoleh konstanta lompatan elektron *intra-strand*

$$t_{i,i+1}^{j,j} = t_{i,i+1}^{pa} \left[1 - \alpha_{i,i+1}^{pa} \sin^2 \left(\Delta_{i,i+1}^{j,j} / 2 \right) \right] \exp \left[-\beta_{i,i+1}^{pa} \left(\cos \varphi_{eq} - \cos \Delta_{i,i+1}^{j,j} \right) \right] / \left[1 - \alpha_{i,i+1}^{pa} \sin^2 \left(\varphi_{eq} / 2 \right) \right],$$

konstanta lompatan elektron *inter-strand*

$$t_{i,i+1}^{j,k} = t_{i,i+1}^{sl} \left[1 - \alpha_{i,i+1}^{sl} \cos^2(\Delta_{i,i+1}^{j,k}/2) \right] \exp \left[\beta_{i,i+1}^{sl} (\cos \varphi_{eq} - \cos \Delta_{i,i+1}^{j,k}) \right] / \left[1 - \alpha_{i,i+1}^{pa} \cos^2(\varphi_{eq}/2) \right],$$

dan konstanta loncatan elektron antarbasa di pasangan basa Watson-Crick

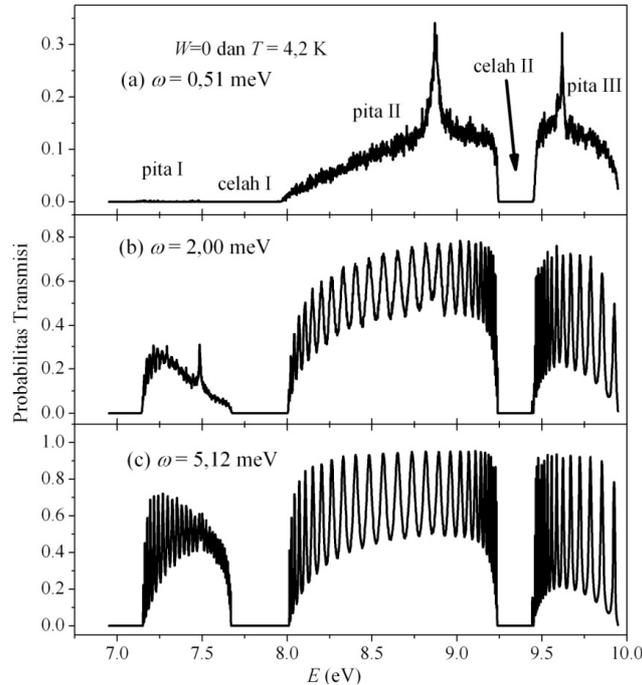
$$t_{i,i}^{j,k} = t_{i,i}^{pp} \left[1 + \alpha_{i,i}^{pp} \sin^2 \left\{ (\varphi_i^j - \varphi_i^k) / 2 \right\} \right] \exp \left[\beta_{i,i}^{pp} \sin^2 \left\{ (\varphi_i^j - \varphi_i^k) / 2 \right\} \right]. \quad (3)$$

Nilai parameter α dan β di persamaan (3) diasumsikan sama untuk setiap pasangan dan untuk konstanta loncatan *intra-strand* masing-masing bernilai $\alpha^{pa} = 6,73$ dan $\beta^{pa} = 6.26$, *inter-strand* $\alpha^{sl} = 1,39$ dan $\beta^{sl} = 2,85$, pasangan Watson-Crick $\alpha^{pp} = 1,0$ dan $\beta^{pp} = 11.5$. Nilai parameter loncatan elektron antarbasa diperlihatkan di tabel 1.

Karena pengaruh temperatur, molekul di medium bergerak acak. Tulang belakang gula-fosfat berinteraksi dengan molekul-molekul tadi secara acak. Interaksi acak ini mengubah energi tulang belakang gula-fosfat sehingga terjadi ketidakteraturan distribusi energi tulang belakang gula-fosfat. Ketidakteraturan ini dilibatkan dalam model dengan cara membuat energi di masing-masing tulang belakang gula-fosfat B_i^k terdistribusi secara uniform dalam rentang $[D-W, D+W]$, dengan W mewakili ketidakteraturan energi dan D merupakan energy situs tulang belakang gula-fosfat tanpa ketidakteraturan. Nilai D dipilih sebesar 9.36 eV.

Tabel 1. Parameter konstanta loncatan elektron antarbasa ($t_{x,y}$) and kopling muatan dan gerak memutar pasangan basa ($b_{x,y}$) untuk Hamiltonian ikatan kuat. [Kurnia Suhendro 2010, Kurnia Suhendro 2014].

Basa (x,y)	$t_{x,y}^{pa}$ (eV)	$t_{x,y}^{sl}$ (eV)	$t_{x,y}^{pp}$ (eV)	$b_{x,y}$ (eV)
G,G	0.3	0.14	0.57	0.0334
C,C	0.38	0.28	0.38	0.0341
G,C	0.14	0.27	-	0.0299



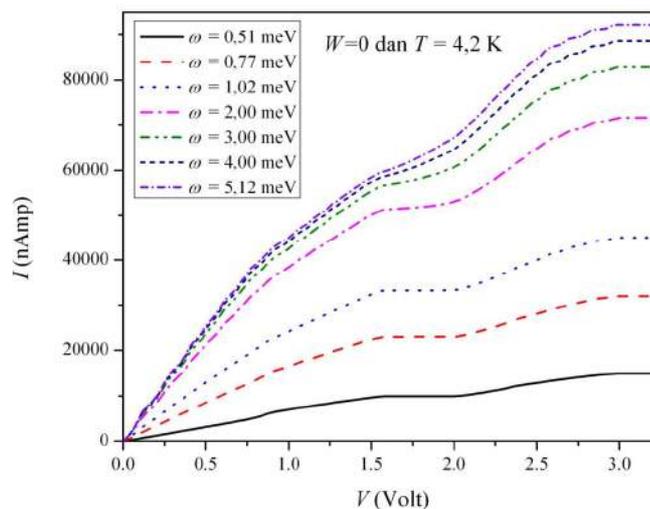
Gambar 2 Probabilitas transmisi muatan di untai ganda Poly(dG)-Poly(dC) dengan ketidakteraturan tulang belakang $W = 0$, frekuensi gerak memutar (a) 0,51 meV, (b) 2,00 meV, dan (c) 5,12 meV pada temperatur 4,2 K.

Teknik matriks transfer dan metode matriks hamburan digunakan secara simultan dengan mengikuti prosedur di [Taniyama 1996] untuk menghitung probabilitas transmisi elektron di setiap energi dari satu elektrode ke elektrode di sebelah berlawanan. Kontak antara molekul DNA dan masing-masing elektrode diwakili oleh konstanta loncatan elektron yang nilainya diambil sama

dengan konstanta loncatan elektron di elektrode metal. Parameter Hamiltonian ikatan kuat pada elektrode metal adalah parameter energi situs sebesar 8.45 eV dan konstanta loncatan elektron 0.75 eV. Karakteristik arus-tegangan (I-V) dihitung dari probabilitas transmisi menggunakan formalisme Landauer-Büttiker[Maciá 2005]. Perhitungan I-V ini dilakukan dengan mengasumsikan bahwa potensial jatuh secara simetri di kontak. Selain itu, pada perhitungan ini digunakan energi Fermi 8.45 eV, sama dengan energi situs elektrode metal. Untuk menghindari hasil yang acak, arus dan juga probabilitas transmisi yang dihitung merupakan hasil perata-rataan dari 400 kali perhitungan dengan konfigurasi sudut dan energi tulang belakang gula-fosfat yang berbeda.

III. HASIL DAN DISKUSI

Probabilitas transmisi di molekul DNA PolyG-PolyC dengan profil energi tulang belakang gula-fosfat yang teratur, $W=0$, telah dihitung untuk beberapa nilai frekuensi gerak memutar pasangan basa pada temperatur 4,2 K. Hasil perhitungan tersebut diperlihatkan di gambar 2. Gambar tersebut memperlihatkan bahwa pada rentang frekuensi yang digunakan, secara umum terdapat tiga pita energi (pita I, pita II, dan pita III) dengan transmisi lebih dari nol. Dengan penurunan frekuensi, probabilitas transmisi pada ketiga pita menurun. Hal ini terjadi karena semakin kecil frekuensi berarti semakin besar ketidakteraturan di profil potensial sistem. Penurunan frekuensi ini, selain menurunkan nilai probabilitas transmisi juga memperlebar pita dan celah antar 2 pita. Fenomena ini teramati terutama pada pita II dan celah I. Pelebaran celah ini merupakan pengaruh perubahan konstanta loncatan elektron antarbasa di dua untai yang berbeda, baik inter-strand maupun antara pasangan basa Watson-Crick, karena gerak memutar pasangan basa. Pola perubahan yang sama karena perubahan frekuensi getar, diamati pula pada kasus untai DNA dengan ketidakteraturan energi tulang belakang gula-fosfat $W = 0,3$ eV.



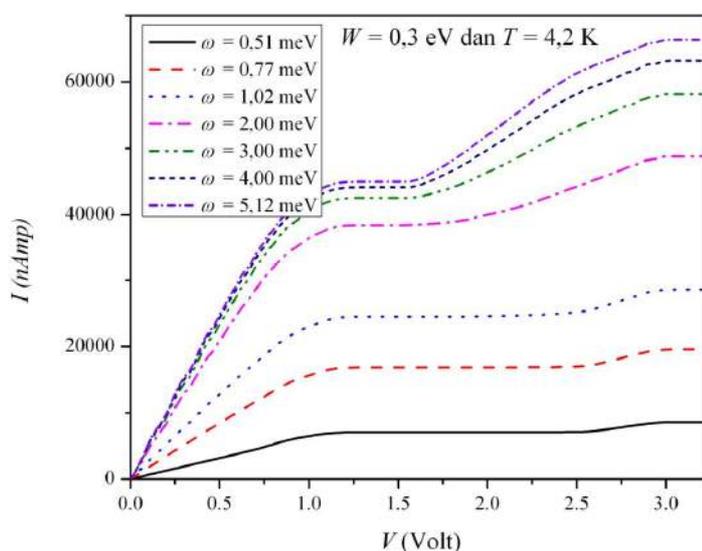
Gambar 3 Karakteristik I-V untai ganda PolyG-PolyC dengan ketidakteraturan tulang belakang $W = 0$ pada beberapa frekuensi gerak memutar dan temperatur 4,2 K.

Kecenderungan perubahan probabilitas elektron berpindah dari elektrode kiri ke elektrode kanan terlihat pada kurva I-V yang diperlihatkan di gambar 3. Gambar 3 memperlihatkan kurva arus sebagai fungsi tegangan untuk beragam frekuensi pada untai DNA dengan profil energi tulang belakang gula-fosfat teratur, $W = 0$. Pada gambar tersebut terlihat bahwa magnitude arus mengecil dengan penurunan frekuensi gerak memutar pasangan basa. Penurunan magnitude arus ini terjadi di semua tegangan yang digunakan. Selain itu, gambar 3 juga memperlihatkan bahwa arus langsung meningkat dengan peningkatan tegangan. Hal ini terjadi karena energi Fermi yang digunakan berada di daerah dengan probabilitas transmisi tidak nol dan arus timbul karena aliran elektron dengan energi sekitar energi Fermi. Pada perhitungan dengan frekuensi rendah, terlihat jelas bahwa arus cenderung linear dengan tegangan pada potensial rendah.

Gambar 3 juga memperlihatkan fitur datar di kurva I-V, arus tidak meningkat dengan peningkatan tegangan, di rentang tegangan sekitar 1,6 – 2,0 V. Dengan peningkatan beda potensial,

elektron yang berada di keadaan yang jauh dari keadaan fermi mulai terlibat di peristiwa transpor. Karena probabilitas transmisi di keadaan yang ada di celah I dan II sama dengan nol, elektron-elektron dengan energi yang bersesuaian tidak dapat terlibat menghantarkan muatan. Hal ini menyebabkan timbulnya fitur datar di sekitar tegangan 1,6 – 2,0 V. Dengan penurunan frekuensi fitur ini terlihat semakin bertambah lebar. Hal ini merupakan akibat dari pelebaran celah, terutama celah I, dengan pengurangan frekuensi. Pelebaran daerah fitur ini memperlihatkan kemungkinan terjadinya pergeseran ambang batas potensial listrik jika energi Fermi terletak di daerah celah I.

Kecenderungan kurva I-V terhadap tegangan yang sama juga teramati pada perhitungan arus pada untai DNA dengan ketidakteraturan energi tulang belakang gula-fosfat $W = 0,3$ eV. Ketidakteraturan energi tulang belakang gula-fosfat menyebabkan probabilitas transmisi lebih rendah sehingga magnitudo arus listrik yang mengalir di untai DNA menjadi lebih rendah. Hasil ini sesuai dengan hasil penelitian lain [Maciá 2006 dan Guo2010]. Penurunan besar arus ini terjadi disemua frekuensi dan tegangan yang digunakan. Untuk semua frekuensi yang digunakan, arus mula-mula langsung meningkat dengan perubahan tegangan. Peningkatan ini hampir linear pada tegangan rendah. Setelah peningkatan ini, pada tegangan sekitar 1,0 Volt arus terlihat tidak berubah dengan tegangan. Fitur datar ini membesar dengan penurunan frekuensi, serupa dengan kasus untai dengan energi tulang belakang gula-fosfat yang teratur $W = 0$.



Gambar 4 Karakteristik I-V untai Poly(dG)-Poly(dC) dengan ketidakteraturan tulang belakang $W = 0,3$ eV pada beberapa frekuensi gerak memutar dan temperatur 4,2 K.

IV. KESIMPULAN

Karakteristik I-V molekul DNA untai ganda PolyG-PolyC dengan panjang 32 pasangan basa telah dihitung. Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa arus langsung meningkat dengan peningkatan tegangan. Selain itu, frekuensi gerak memutar yang lebih rendah menyebabkan arus yang mengalir melalui molekul DNA menjadi lebih rendah. Secara umum, gerakan memutar mempengaruhi sifat transpor molekul, semakin kecil frekuensi memutar sifat transpor semakin buruk. Pelebaran fitur datar pada potensial menengah mengindikasikan kemungkinan fenomena perbesaran ambang potensial pada I-V, karena perhitungan arus sangat tergantung penentuan nilai energi Fermi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Daniel K. Suhendro yang telah memberikan nilai parameter-parameter perhitungan. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada UPP-IPD Universitas Indonesia atas izin menggunakan fasilitas. Penelitian ini dibiayai oleh Hibah Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi (PUPT) Tahun Anggaran 2015 Nomor:0529/UN2.R12/HKP.05.00/2015 .

DAFTAR PUSTAKA

- Boon, E.M., Livingston A.L., Chmiel N.H., David S.S., dan Barton J.K., 2003, DNA-mediated charge transport for DNA repair, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **100**, 12543–12547.
- Braun, E., Eichen Y., Sivan U., dan Ben-Yoseph G, 1998, DNA-templated assembly and electrode attachment of a conducting silver wire, *Nature*, **391**, 775–778.
- Dandliker, P.J., Holmlin R.E., dan Barton J.K., 1997, Oxidative Thymine Dimer Repair in the DNA Helix, *Science*, **275**, 1465–1468.
- Endress, R. G., Cox D. L., dan Singh R.R.P, 2004, Colloquium: The quest for high-conductance DNA, *Review of Modern Physics*, **76**, 195-214.
- Eley, D. D. dan Spivey D.I., 1962, Semiconductivity of organic substances, *Transactional Faraday Society*, **58**, 411.
- Fink, H.W. dan Schönenberger C., 1999, Electrical conduction through DNA molecules, *Nature*, **398**, 407–410.
- Genereux, J.C., Boal A.K dan Barton J.K., 2010, DNA-mediated charge transport in redox sensing and signaling, *Journal of the American Chemical Society*, **132**, 891–905.
- Guo, A.-M., Xiong S.-J., Yang Z., dan Zhu H.-J., 2008, Enhancement of transport in DNA-like systems induced by backbone disorder, *Physical Review E*, **78**, 0619221–0619225.
- Guo AM., Yang Z., Zhu H.-J., dan Xiong S.-J., 2010, Influence of backbone on the charge transport properties of G4-DNA molecules: a model-based calculation, *Journal of Physics: Condensed Matter*, **22**, 065102-065108.
- Jo Y.-S., Lee Y., dan Roh Y., 2003, Current–voltage characteristics of λ - and poly-DNA, *Materials Science and Engineering: C*, **23**, 841–846
- Kasumov, A., Kociak M., Guéron S., Reulet B., Volkov V.T., Klinov D.V., dan Bouchiat H., 2001, Proximity-induced superconductivity in DNA, *Science*, **291**, 280–282.
- Klotsa, D., Römer R.A., dan Turner M.S., 2005, Electronic transport in DNA, *Biophysical journal*, **89**, 2187–2198.
- Kratochvílová, I., Todorciuc T., Král K., Němec H., Buncěk M., Šebera J., Záliš S., Vokáčová Z., Sychrovský V., Bednářová L., Mojžeš V., dan Schneider B., 2010, Charge transport in DNA oligonucleotides with various base-pairing patterns, *The journal of physical chemistry. B*, **114**, 5196–5205.
- Kurnia Suhendro, D., Yudiarsah E., dan Saleh R., 2010, Effect of phonons and backbone disorder on electronic transport in DNA, *Physica B: Condensed Matter*, **405**, 4806–4811.
- Kurnia Suhendro, D, 2014, Komunikasi pribadi.
- Maciá, E., Triozon F., dan Roche S., 2005, Contact-dependent effects and tunneling currents in DNA molecules, *Physical Review B*, **71**, 1131062–1131065.
- Maciá, E. dan Roche S., 2006, Backbone-induced effects in the charge transport efficiency of synthetic DNA molecules, *Nanotechnology*, **17**, 3002–3007.
- Miller Jr, J.H., Villagrán M.Y.S, Maric S., dan Briggs S.M., 2015, Normal and Impaired charge transport in biological system, *Physica B*, **460**, 119-125.
- Muren, N.B., Olmon E.D., dan Barton J.K., 2012, Solution, surface, and single molecule platforms for the study of DNA-mediated charge transport, *Physical chemistry chemical physics*, **14**, 13754–13771.
- Nokhrin, S., Baru M., dan Lee J.S., 2007, A field-effect transistor from M-DNA, *Nanotechnology*, **18**, 095205-095210.
- DePablo, P.J., dan Moreno-Herrero F., 2000, Absence of dc-Conductivity in λ -DNA, *Physical Review Letters*, **85**, 4992–4995.
- Porath, D., Bezryadin A., de Vries S., dan Dekker C., 2000, Direct measurement of electrical transport through DNA molecules, *Nature*, **403**, 635–638.
- Reed, M. A., Zhou C., Muller C.J., Burgin T.P., Tour J.M., 1997, Conductance of a molecular junction, *Sciences*, **278**, 252.
- Roche, S., 2003, Sequence Dependent DNA-Mediated Conduction, *Physical Review Letters*, **91**, 1081011–1081014.
- Sontz, P.A., Muren N.B., dan Barton J.K., 2012, DNA charge transport for sensing and signaling, *Accounts of chemical research*, **45**, 1792–1800.
- Taniyama, H. dan Yoshii A., 1996, Scattering-matrix method for the tight-binding model of heterostructure electronic states, *Physical Review B*, **53**, 9993–9999.

- Yakushevich, L.V., 2004, *Nonlinear physics of DNA*. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH, pp. 174.
- Yu, Z. dan Song X., 2001, Variable range hopping and electrical conductivity along the DNA double helix, *Physical Review Letters*, **86**, 6018-6021.
- Zaffino, R.L., Mir M., dan Samitier J., 2014, Label-free detection of DNA hybridization and single point mutations in a nano-gap biosensor, *Nanotechnology*, **25**, 105501.
- Zhou, C., Desphande M.R., Reed M.A., Jones II L., dan Tour J.M., 1997, Nanoscale metal/self-assembled monolayer/metal heterostructures, *Applied Physics Letters*, **71**, 611.