

**DAFTAR ISI**

Pengaruh Variasi Unsur Gd pada Struktur Kristal Superkonduktor Y-358 (Y <sub>3</sub> -XGdxBa <sub>5</sub> Cu <sub>8</sub> O <sub>18-δ</sub> ) (Suryana Deva*, Wayan Gede Suharta, I Ketut Putra).....	1
Analisis Pengaruh Konsentrasi Larutan Gula Dan Resin terhadap Transmittansi Laser (Hartono*, Farzand Abdullatif, Sugito).....	5
Penerapan Formalisme Euler-Lagrange dan Solusi Persamaan Geraknya dalam Perancangan Pompa Air dengan Kincir Sebagai Tenaga Penggerak (Jamrud Aminuddin*, Mukhtar Effendi, Nurhayati, Agustina Widiyani, dan Sunardi).....	9
Tinjauan Mengenai Massa Boson Tera Netral Z' dalam Varian Model Simetri Kiri-Kanan (Akmal Ferdian* dan R. Farzand Abdullatif).....	13
Pola Kurva Isodosi Dari Penyinaran Berkas Profil Datar pada Kanker Payudara Dengan Teknik Tangensial Menggunakan MCNPX (Aat Maftuhaturun, Aris Haryadi*, Wihantoro, Arundito Widikusumo dan Etmy Kurniasih).....	19

## Pengaruh Variasi Unsur Gd pada Struktur Kristal Superkonduktor Y-358 (Y<sub>3-x</sub>Gd<sub>x</sub>Ba<sub>5</sub>Cu<sub>8</sub>O<sub>18-δ</sub>)

Suryana Deva\*, Wayan Gede Suharta, I Ketut Putra

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,

Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran, Badung, Bali

\*e-mail: Suryanadeva2504@gmail.com

**Abstrak** - Telah dilakukan penelitian mengenai pengaruh variasi unsur Gd pada struktur kristal superkonduktor Y-358 (Y<sub>3-x</sub>Gd<sub>x</sub>Ba<sub>5</sub>Cu<sub>8</sub>O<sub>18-δ</sub>). Pada penelitian ini sampel di magnetic stirrer selama 24 jam, dikalsinasi dengan menggunakan suhu 600° C selama 3 jam dan disintering dengan menggunakan suhu 900° C selama 10 jam. Hasil karakterisasi XRD memperlihatkan puncak tajam yang menandakan terjadinya kristalisasi dengan baik. Pengaruh variasi unsur Gd<sub>0,1</sub>, Gd<sub>0,2</sub>, Gd<sub>0,3</sub> dan Gd<sub>0,4</sub> pada superkonduktor Y<sub>3-x</sub>Gd<sub>x</sub>Ba<sub>5</sub>Cu<sub>8</sub>O<sub>18-δ</sub> mengakibatkan berubahnya nilai parameter kisi yaitu 3,838267 Å; 3,836952 Å; 3,835818 Å; 3,835403 Å dan yaitu 3,784541 Å; 3,790550 Å; 3,820195 Å; 3,822933 Å serta nilai parameter kisi yaitu 30,621809 Å; 30,254430 Å; 30,236952 Å dan 30,227880 Å. Dan masing-masing sampel memiliki gugus fungsi yang sama pada bilangan gelombang tertentu. Gugus fungsi yang terdapat pada masing-masing sampel adalah Aromatik Mono, Aromatik Para, Alkohol Anhidrida Eter, Ester, Asam karboksilat Nitro (N=O), Alkil C-H (Stretching), Alkohol fenol, Asam karboksilat OH (alkohol, fenol, ikatan hidrogen).

**Kata kunci:** Superkonduktor, Substitusi, kalsinasi, sintering, XRD

**Abstract** – Research on the effect of Gd element variations on the Y-358 (Y<sub>3-x</sub>Gd<sub>x</sub>Ba<sub>5</sub>Cu<sub>8</sub>O<sub>18-δ</sub>). Superconducting crystal structure has been carried out. In this study the samples were held in a magnetic stirrer for 24 hours, calcined using a temperature of 600 ° C for 3 hours and sintering using a temperature of 900 ° C for 10 hours. The results of XRD characterization showed sharp peaks that indicate the occurrence of crystallization well. The effect of variations in elements Gd<sub>0,1</sub>, Gd<sub>0,2</sub>, Gd<sub>0,3</sub> and Gd<sub>0,4</sub> on the superconductor Y<sub>3-x</sub>Gd<sub>x</sub>Ba<sub>5</sub>Cu<sub>8</sub>O<sub>18-δ</sub> results in changes in the lattice parameter values of 3,838267 Å; 3,836952 Å; 3,835818 Å; 3,835403 Å and namely 3,784541 Å; 3,790550 Å; 3,820195 Å; 3,822933 Å and the lattice parameter value is 30,621809 Å; 30,254430 Å; 30,236952 Å and 30,227880 Å. And each sample has the same functional group at a certain wave number. The functional groups found in each sample were Mono Aromatic, Para Aromatic, Ether Alcohol Anhydride, Esters, Nitro Carboxylic Acid (N = O), Alkyl CH (Stretching), Phenol Alcohol, OH Carboxyl Acid (alcohol, phenol, hydrogen bonds).

**Key words:** Superconductor, Substitution, calcination, sintering, XRD

### PENDAHULUAN

Superkonduktor merupakan material yang memiliki resistivitas listrik yang bernilai nol dibawah temperatur kritisnya, yang artinya dapat menghantarkan arus listrik tanpa adanya sumber tegangan.

Bahan superkonduktor ditemukan oleh Heike Kamerlingh Onnes pada tahun 1911 telah memberikan peluang aplikasi sangat luas yang mengacu pada efisiensi energi dalam jangka waktu yang lama.

Superkonduktor Y-358 dengan rumus kimia Y<sub>3</sub>Ba<sub>5</sub>Cu<sub>8</sub>O<sub>18-δ</sub> mempunyai suhu kritis yang lebih tinggi yaitu sekitar 94°K. Pada penelitian ini dilakukan sintesis superkonduktor Y<sub>3</sub>Ba<sub>5</sub>Cu<sub>8</sub>O<sub>18-δ</sub> dengan substitusi unsur Gd (Gadolinium). Gadolinium (Gd) merupakan

salah satu unsur paramagnetik sangat kuat yang merupakan persyaratan penting untuk senyawa kontras dan mempunyai kemampuan menyerap neutron yang sangat tinggi.

Proses sintesis sampel Y<sub>3-x</sub>Gd<sub>x</sub>Ba<sub>5</sub>Cu<sub>8</sub>O<sub>18-δ</sub> maka dilakukan karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR).

### LANDASAN TEORI

#### A. Superkonduktor

Salah satu sifat bahan yang paling penting adalah yaitu resistivitas listrik. Berdasarkan kandungan resistivitas yang dimiliki, suatu bahan dapat diklasifikasikan menjadi empat macam, yaitu bahan isolator, semikonduktor, konduktor dan superkonduktor. Suatu bahan

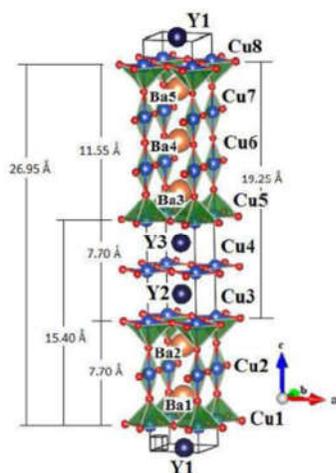
dikatakan superkonduktor apabila mempunyai sifat yaitu tanpa hambatan (hambatan nol) untuk semua suhu di bawah suhu kritis dan mempunyai medan magnetik di dalam bahan superkonduktor sama dengan nol.

## B. Sejarah Superkonduktor

Bahan superkonduktor pertama kali ditemukan pada tahun 1911 oleh seorang fisikawan Belanda dari Universitas Leiden yaitu Heike Kamerlingh Onnes. Pada tanggal 10 Juli 1908, Onnes berhasil mencairkan helium dengan cara mendinginkannya hingga suhu 4 K atau  $-269^{\circ}\text{C}$ . Kemudian Onnes pada tahun 1911 mulai mempelajari sifat-sifat listrik dari logam pada suhu yang sangat dingin. Pada saat itu diketahui bahwa hambatan dari suatu logam akan menurun ketika didinginkan di bawah suhu ruang, tetapi belum ada yang dapat mengetahui berapa batas bawah hambatan yang dicapai ketika temperatur logam mendekati 0 K atau nol mutlak.

## C. Superkonduktor YBCO

Superkonduktor YBCO yang memiliki kepanjangan Yttrium Barium Cuprum Oxide termasuk superkonduktor suhu tinggi dengan nilai suhu kritis sekitar 90 K. Superkonduktor YBCO juga termasuk ke dalam superkonduktor tipe II. Fase YBCO-358 memiliki  $T_c$  yang lebih tinggi dari pada  $T_c$  fase YBCO-123. Hasil refinemen Rietveld pola XRD fase YBCO-358 kisi kristalnya memiliki simetri orthorhombic dalam group ruang pmm2 dengan parameter kisi  $a = 3,9211(3) \text{ \AA}$ ,  $b = 3,8514(1) \text{ \AA}$ ,  $c = 31,0170(0) \text{ \AA}$  [1].



**Gambar 1** Struktur  $\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$  yang dibuat dari refinement Rietveld data XRD [1]

## D. Sintesis

Dalam sintesis bahan superkonduktor, proses kalsinasi dan sintering merupakan proses yang sangat penting dalam pembentukan suatu senyawa superkonduktor. Kalsinasi adalah proses pembakaran tahap awal yang merupakan reaksi dekomposisi secara endotermik (memerlukan panas) dan berfungsi melepaskan gas-gas dalam bentuk karbon atau hidroksida, sehingga menghasilkan bahan dalam bentuk karbon atau hidroksida, sehingga menghasilkan bahan dalam bentuk oksida dengan kemurnian yang tinggi. Sintering digunakan untuk meningkatkan kerapatan sampel sesuai dengan struktur mikro dan komposisi fase yang diinginkan.

## METODE

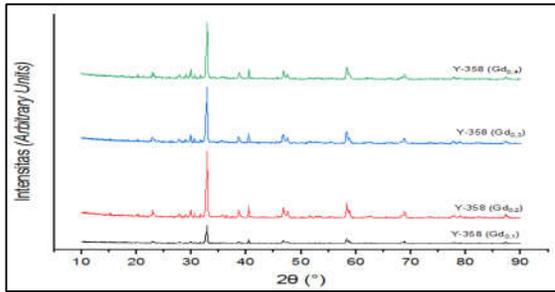
Dalam penelitian ini Superkonduktor Y-358 dengan rumusan kimia  $\text{Y}_{3-x}\text{Gd}_x\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18-\delta}$  dibuat dari bahan awal serbuk  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{CuO}$  dan  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ . Yang diberi variasi adalah unsur Gd yaitu 0,1, 0,2, 0,3 dan 0,4. Setelah menimbang serbuk sesuai dengan perhitungan, semua serbuk kemudian dicampur menjadi satu di dalam  $\text{HNO}_3$  kemudian diaduk dengan menggunakan *magnetic stirrer* selama kurang lebih 24 jam. Selanjutnya larutan dipanaskan pada suhu  $100^{\circ}\text{C}$  sampai mengkerak. Selanjutnya dikalsinasi pada tungku pemanas (furnace) yang diatur pada suhu  $600^{\circ}\text{C}$  selama 3 jam. Bahan yang telah dikalsinasi kemudian dilakukan sintering pada tungku pemanas selama 10 jam dengan suhu sintering  $900^{\circ}\text{C}$  selama 10 jam. Setelah disintering, selanjutnya sampel digerus kembali sampai membentuk serbuk halus. Serbuk ini kemudian dikarakterisasi dengan menggunakan XRD dan FTIR.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Hasil Karakterisasi XRD

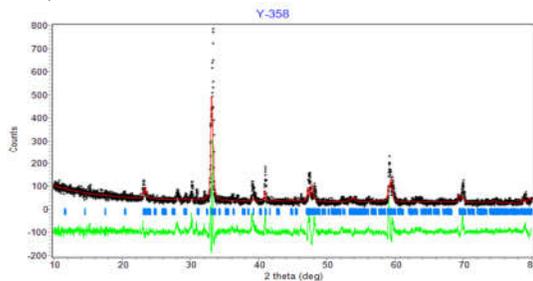
#### Superkonduktor $\text{Y}_{3-x}\text{Gd}_x\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18-\delta}$

Karakterisasi XRD dilakukan pada sudut  $2\theta$  antara  $10^{\circ}$ – $90^{\circ}$ . Spektrum hasil karakterisasi XRD dari ke empat sampel superkonduktor  $\text{Y}_{3-x}\text{Gd}_x\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18-\delta}$  yang digabung menjadi satu dengan variasi nilai  $x = 0,1, 0,2, 0,3,$  dan  $0,4$  dapat dilihat pada Gambar 2.

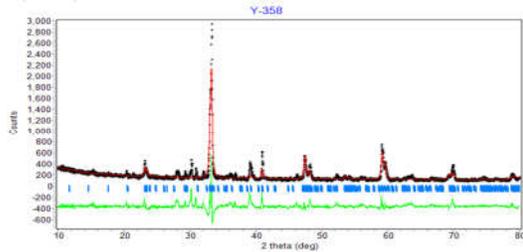


**Gambar 2** Pola XRD superkonduktor  $Y_{3-x}Gd_xBa_5Cu_8O_{18-\delta}$  dengan variasi nilai  $x=0,1, 0,2, 0,3$  dan  $0,4$ .

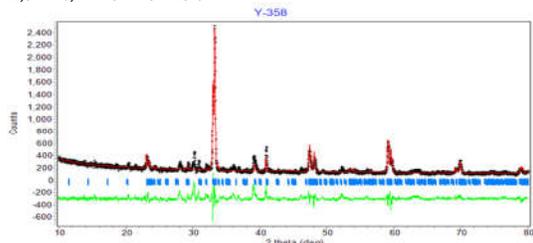
Selanjutnya hasil XRD di-Refinement dengan program rietica. Refinement merupakan pencocokan data terukur dari hasil XRD dengan data terhitung dari *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD). Refinement ini dilakukan dengan menggunakan referensi [1] yang mempunyai struktur kristal orthorombik dengan grup ruang Pmm2 No. 25 dengan nilai parameter kisi  $a = 3,9211 \text{ \AA}$ ,  $b = 3,8514 \text{ \AA}$  dan  $c = 31,0170 \text{ \AA}$ .



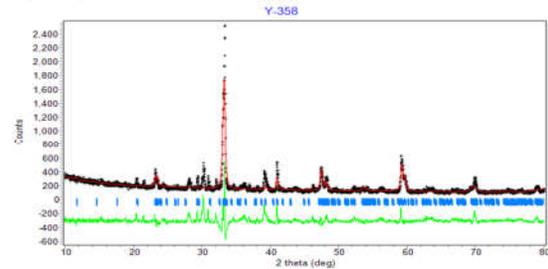
**Gambar 3** Hasil refinement superkonduktor  $Y_{2,9}Gd_{0,1}Ba_5Cu_8O_{18-\delta}$



**Gambar 4** Hasil refinement superkonduktor  $Y_{2,8}Gd_{0,2}Ba_5Cu_8O_{18-\delta}$



**Gambar 5** Hasil refinement superkonduktor  $Y_{2,7}Gd_{0,3}Ba_5Cu_8O_{18-\delta}$



**Gambar 6** Hasil refinement superkonduktor  $Y_{2,6}Gd_{0,4}Ba_5Cu_8O_{18-\delta}$

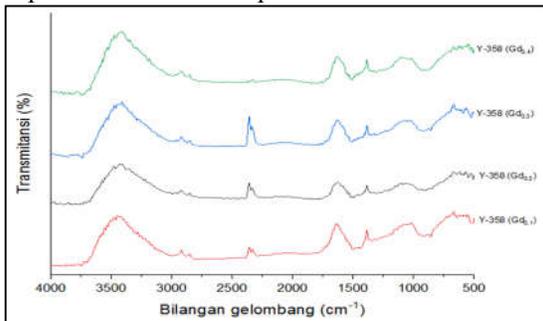
**Tabel 1** Parameter kisi  $Y_{3-x}Gd_xBa_5Cu_8O_{18-\delta}$

Sampel	Parameter Kisi			$\chi^2$
	$a$ (Å)	$b$ (Å)	$c$ (Å)	
Gd <sub>0,1</sub>	3,838267	3,784541	30,621809	3,204
Gd <sub>0,2</sub>	3,836952	3,790550	30,254430	5,718
Gd <sub>0,3</sub>	3,835818	3,820195	30,236952	4,072
Gd <sub>0,4</sub>	3,835403	3,822933	30,227880	2,117

**B. Hasil Analisis Superkonduktor  $Y_{3-x}Gd_xBa_5Cu_8O_{18-\delta}$  menggunakan FTIR**

Berikut merupakan hasil perbandingan analisis superkonduktor  $Y_{3-x}Gd_xBa_5Cu_8O_{18-\delta}$  dengan menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR).

Spektrum hasil karakterisasi FTIR yang digabung menjadi satu dari sampel superkonduktor  $Y_{3-x}Gd_xBa_5Cu_8O_{18-\delta}$  yang dikalsinasi dengan menggunakan suhu  $600^\circ C$  selama 3 jam dan yang disintering dengan menggunakan suhu  $900^\circ C$  selama 10 jam dengan variasi nilai  $x$  yaitu 0,1, 0,2, 0,3 dan 0,4 dapat dilihat pada Gambar 7



**Gambar 7** Perbandingan spektrum FTIR superkonduktor  $Y_{3-x}Gd_xBa_5Cu_8O_{18-\delta}$  yang dikalsinasi menggunakan suhu  $600^\circ C$  dan yang disintering

dengan menggunakan 900°C dengan variasi  $x$  yaitu 0,1, 0,2, 0,3 dan 0,4

Berikut merupakan data gugus fungsi yang didapatkan pada bilangan gelombang yang dimiliki oleh sampel superkonduktor  $Y_{3-x}Gd_xBa_5Cu_8O_{18-\delta}$  seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2** Gugus Fungsi pada bilangan gelombang sampel superkonduktor  $Y_{3-x}Gd_xBa_5Cu_8O_{18-\delta}$

No	Bilangan Gelombang (cm <sup>-1</sup> )				Gugus Fungsi
	Y-358 (Gd <sub>0,1</sub> )	Y-358 (Gd <sub>0,2</sub> )	Y-358 (Gd <sub>0,3</sub> )	Y-358 (Gd <sub>0,4</sub> )	
1	642,30	642,30	592,15	599,86	Aromatik Mono
2	856,39	908,47	858,32	856,39	Aromatik Para
3	1502,55	1502,54	1514,12	1514,12	Alkohol Anhidrida Eter, Ester, asam karboksilat Nitro (N=O)
4	2879,72	2991,59	2951,09	2991,59	Alkil C-H (Stretching)
5	3464,15	3464,15	3462,22	3460,30	Alkohol, Fenol, Asam Karboksilat OH (asam karboksilat, ikatan hidrogen)

## KESIMPULAN

Pola difraktogram yang dihasilkan oleh masing-masing sampel dengan variasi nilai  $x$  yaitu 0,1, 0,2, 0,3 dan 0,4 hampir sama, baik pola puncaknya maupun posisi sudut  $2\theta$  nya, akan tetapi mempunyai nilai intensitas yang berbeda. Secara umum dapat diketahui bahwa hasil karakterisasi XRD memunculkan puncak-puncak yang tajam yang menandakan kristalisasi telah terjadi dengan baik.

Pengaruh variasi unsur Gd<sub>0,1</sub>, Gd<sub>0,2</sub>, Gd<sub>0,3</sub> dan Gd<sub>0,4</sub> pada superkonduktor  $Y_{3-x}Gd_xBa_5Cu_8O_{18-\delta}$  mengakibatkan berubahnya nilai parameter kisi  $a$  yaitu 3,838267 Å; 3,836952 Å; 3,835818 Å; 3,835403 Å dan  $b$  yaitu 3,784541 Å; 3,790550 Å; 3,820195 Å; 3,822933 Å serta nilai parameter kisi  $c$  yaitu 30,621809 Å; 30,254430 Å; 30,236952 Å dan 30,227880 Å. Masing-masing sampel memiliki gugus fungsi yang sama pada bilangan gelombang tertentu. Gugus fungsi yang terdapat pada masing-masing sampel adalah Aromatik Mono, Aromatik Para,

Alkohol Anhidrida Eter, Ester, Asam karboksilat Nitro (N=O), Alkil C-H (Stretching), Alkohol fenol, Asam karboksilat OH (alkohol, fenol, ikatan hidrogen).

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada semua yang membantu dan mendukung dalam penyusunan makalah ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. A. Landinez, M. Cambrera Baez and J. Roa-Rojas, Grupo de Fisica de Nuevos Materiales. Universidad Nacional de Colombia, A. A. 5997, Bogota DC, Colombia (2012)
- [2] S. Juhari, Variasi Suhu kalsinasi dan Sintering dalam Sintesis Bahan Superkonduktor B i-2212. Skripsi S1 Fisika FMIPA Universitas Lampung. Bandar Lampung (2005)
- [3] W. G. Suharta, Sintesis, Struktur Kristal dan Sifat Magnetik Superkonduktor REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (RE = Nd, Eu, Gd).” Laporan Disertasi, (2013).

## Analisis Pengaruh Konsentrasi Larutan Gula Dan Resin terhadap Transmittansi Laser

Hartono\*, Farzand Abdullatif, Sugito

Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Jenderal Soedirman Purwokerto

Jl. Dr. Soeparno 61, Kampus Unsoed Karangwangkal

\*email: harlaras@gmail.com

**Abstrak** – Penelitian ini merupakan penelitian pendahuluan yang bertujuan untuk mengkarakterisasi bahan yang dapat digunakan sebagai pemandu cahaya. Pemandu cahaya dalam penelitian ini dibuat menggunakan selang plastik yang di dalamnya dibiarkan berisi udara sebagai kondisi referensi. Sampel lain dibuat menggunakan selang yang sama tetapi diisi aquades, larutan gula dengan variasi konsentrasi 10%, 20%, 30%, 40% dan 50% serta diisi juga dengan resin cair bening. Sampel sebagai bahan uji dibuat dengan panjang masing-masing 25 cm dan 50 cm dan diameter bagian dalam selang  $\frac{1}{4}$  inch. Pengujian sampel dilakukan dengan menembakkan laser ke dalam ujung selang dan mengukur intensitas laser yang keluar dari ujung selang yang lain. Pengukuran intensitas sinar laser menggunakan sensor LDR yang selanjutnya diakuisisi menjadi intensitas transmittansi. Hasil pengujian terhadap semua sampel menunjukkan bahwa transmittansi cahaya dipengaruhi oleh indeks bias bahan dan kepekatan partikel dalam fluida sampel. Sampel dengan konsentrasi lebih besar dari 30% dan panjang selang 50 cm menghasilkan transmittansi kurang dari 50%. Hal serupa juga terjadi pada sampel dari bahan resin cair bening, dimana pada selang dengan panjang 25 cm hanya menghasilkan transmittansi sebesar 43,27%, sementara pada selang 50 cm hanya 26,38%. Berdasarkan analisis, penurunan tingkat transmittansi dikarenakan oleh perbedaan indeks bias antara selang dan fluida pengisi selang. Seharusnya, indeks bias kulit selang jauh lebih kecil dari pada indeks bias bahan pengisi selang, sehingga peristiwa pemantulan internal sempurna dapat terjadi dengan baik.

**Kata kunci:** pemandu cahaya, transmittansi, indeks bias, pemantulan internal sempurna

### PENDAHULUAN

Wilayah negara Indonesia sebagian besar mendapatkan paparan matahari dengan jumlah yang sangat melimpah. Potensi energi matahari rata-rata di Indonesia mencapai  $4,8 \text{ kWh/m}^2$  (Hamdi, 2014). Namun demikian, penggunaan energi matahari sebagai energi listrik maupun penerangan pada ruangan masih sangat minim.

Penerangan ruangan pada waktu siang hari dapat lebih dioptimalkan dengan memanfaatkan cahaya matahari. Salah satu persoalan yang dihadapi adalah ruangan yang sudah terlanjur dibuat tanpa akses cahaya luar yang cukup. Salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah dengan membuat saluran cahaya agar dapat masuk ke ruangan-ruangan yang tidak mendapatkan akses cahaya matahari secara langsung. Fiber optik atau serat optik yang selama ini digunakan untuk transmisi data dapat digunakan sebagai media untuk menyalurkan cahaya matahari [1]. Namun demikian, fiber optik yang digunakan mempunyai ukuran diameter inti yang sangat kecil, yaitu 6 mm. Metode lain dapat digunakan untuk menyalurkan cahaya matahari ke dalam ruangan. *Light Tube Horizontal* merupakan

salah satu terobosan yang dapat digunakan untuk mengarahkan cahaya agar masuk dalam ruangan. Sistem penyaluran cahaya menggunakan pipa atau tabung menggunakan prinsip pemantulan dalam pipa [2,3].

Penyaluran cahaya matahari menggunakan fiber optik pabrikan maupun menggunakan sistem pipa masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan. Kelebihan menggunakan fiber optik adalah dapat ditransmisikan pada jarak yang lebih jauh dan lebih fleksibel. Kekurangannya adalah kurang efisien, mengingat ukuran fiber optik pabrikan yang mempunyai diameter yang sangat kecil. Sistem transmisi cahaya menggunakan pipa mempunyai kelebihan lebih efisien, karena dapat dibuat dengan bahan yang lebih mudah dan murah serta ukuran yang relatif besar. Ukuran pipa yang besar akan menyalurkan cahaya yang lebih banyak. Kekurangannya adalah tidak fleksibel.

Peningkatan media transmisi menggunakan fiber optik dilakukan dengan berbagai cara. Sistem transmisi jarak jauh dengan menggunakan *multycore* merupakan salah satu cara untuk mengatasi keterbatasan ukuran

diameter core dari fiber optik [4] Sementara teknik lain untuk mencoba mengatasi persoalan terkait fiber optik adalah dengan memvariasi bahan dari core optiknya. Core optik merupakan bagian dari fiber optik yang berperan melakukan proses pemantulan sempurna di dalam medium tersebut, sehingga cahaya dapat ditransmisikan di dalamnya. Inovasi bahan core optik yang telah dikembangkan antara lain menggunakan granula silika dan polimer dopping perylene derivatif [5,6]. Sistem transmisi cahaya akan lebih optimal jika media yang digunakan mempunyai ukuran yang lebih besar. Penelitian ini mengkaji tentang kemampuan bahan untuk mentransmisikan cahaya.

Perilaku gelombang secara umum dapat mengalami pembiasan, pemantulan, polarisasi, dispersi dan difraksi. Peristiwa pembiasan gelombang cahaya akan terjadi apabila cahaya melalui batas dua medium yang mempunyai indeks bias yang berbeda. Perbedaan indeks bias antara dua medium akan menyebabkan perubahan kecepatan perambatan gelombang, tidak terkecuali cahaya matahari. Akibat yang terjadi dari peristiwa ini adalah terjadinya perubahan atau pembelokan arah perambatan cahaya. Peristiwa lain yang dapat terjadi dari sebuah gelombang cahaya adalah pemantulan. Pemantulan gelombang cahaya terjadi apabila menumbuk bidang pemantul. Pemantulan gelombang cahaya terjadi apabila menabrak bidang pemantul. Konsep dasar terjadinya pemantulan dijelaskan dalam sebuah hukum Snellius tentang pemantulan, yaitu (1) Gelombang datang, garis normal dan gelombang pantul berada pada satu bidang datar, (2) Besarnya sudut datang sama dengan sudut pantul [7].

Serat optik digunakan sebagai media transmisi cahaya untuk pencahayaan sudah mulai dikembangkan sejak 1982. Mulai saat itu juga dikembangkan berbagai metode penggunaannya sebagai sarana untuk menunjang sistem penerangan [1]. Konsep pembuatan serat optik pada dasarnya berada pada material inti (*core*) dan selongsong pembungkusnya (*cladding*). Material inti secara umum terbuat dari bahan bening yang mempunyai indeks bias tinggi. Sementara bagian selongsong merupakan bahan reflektor atau material dengan indeks bias rendah. Seiring perkembangan teknologi, sebuah serat optik dapat berisi beberapa inti. Jenis serat optik yang hanya berisi satu inti disebut dengan *single*

*core*, dan yang berisi inti banyak disebut dengan *multycore* [4].

Awal perkembangan serat optik, material inti terbuat dari serbuk kaca. Seiring dengan perkembangan teknologi, mulai dikembangkan berbagai material penyusun inti. Kajian terkait dengan inti serat optik untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dibuat dengan metode silika granula berbasis sol-gel [5]. Metode ini diklaim dapat memproduksi serat optik dengan cepat. Namun demikian, hasilnya mempunyai tingkat kerugian transmisi sebesar 1 dB/m. Kerugian ini dapat dikurangi dengan penggilingan berulang dan pencairan kembali. Hal ini menunjukkan bahwa kemungkinan penggunaan material lain untuk bahan inti serat optik sangat berpeluang untuk diteliti.

## METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan metode eksperimen di Laboratorium Elektronika Instrumentasi dan Geofisika Jurusan Fisika FMIPA Unsoed. Kajian awal dari penelitian ini adalah menentukan tingkat transmitansi dari sampel yang telah dibuat. Sampel yang dibuat adalah sebuah media transmisi cahaya berupa selang yang berisi larutan gula dan resin cair bening. Selang yang digunakan adalah selang bening dengan ukuran  $\frac{1}{4}$  inch dan panjang masing-masing 25 cm dan 50 cm. Larutan gula dimasukkan ke dalam selang yang berguna sebagai inti (*core*) sebuah serat optik.

Larutan gula yang digunakan sebagai bahan sampel divariasi konsentrasinya dengan nilai variasi 10%, 20%, 30%, 40% dan 50%. Setiap variasi larutan gula masing-masing dimasukkan ke dalam selang yang panjangnya 25 cm dan 50 cm. Selang yang sudah diisi larutan ditutup pada kedua ujungnya dengan menggunakan plastik bening yang tipis.

Kemampuan transmitansi dari setiap sampel diuji dengan menggunakan bantuan laser sebagai sumber dan sensor cahaya untuk tingkat transmitansinya. Pengujian dilakukan dengan menembakkan laser pada salah satu ujung dan mendeteksi keluarannya menggunakan sensor cahaya. Sensor cahaya akan memberikan respon berupa tegangan. Tegangan keluaran sensor akan sebanding dengan tingkat intensitas sinar laser. Kenaikan intensitas laser akan direspon oleh sensor cahaya dengan kenaikan tegangan.

Pengujian awal dilakukan terhadap sampel referensi, yaitu selang kosong. Sampel dengan bahan aquades juga dilakukan pengujian untuk

digunakan sebagai pembanding. Tegangan respon sensor pada saat laser ditembakkan melalui selang kosong dijadikan sebagai kondisi intensitas awal ( $I_0$ ) yang kemudian disebut tegangan awal ( $V_0$ ). Semua tegangan respon sensor dari setiap sampel akan dibandingkan terhadap  $V_0$ . Nilai transmitansi dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Tr = \frac{V_s}{V_0} 100\% \tag{1}$$

$V_s$  merupakan tegangan keluaran sensor pada setiap sampel uji, dan  $Tr$  adalah nilai transmitansinya.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pengujian yang dilakukan terhadap semua sampel menghasilkan tingkat transmitansi yang dapat ditunjukkan seperti pada **Gambar 1**. Kemampuan setiap media dalam mentransmisikan cahaya sangat dipengaruhi oleh banyak faktor. Faktor-faktor tersebut antara lain kekeruhan, keberadaan zat pelarut, temperatur, indeks bias, warna dan masih banyak lagi. Pada penelitian ini hanya akan ditinjau faktor indeks bias dan kondisi zat pelarutnya. Berdasarkan pada **Tabel 1** dan **Gambar 1** dapat dilihat adanya penurunan tingkat transmitansi cahaya. Penurunan secara signifikan terjadi ketika konsentrasi larutan gula sudah melebihi 30%. sementara pada media yang berisi resin bening cair juga mengalami penurunan yang cukup tinggi, dalam hal ini hanya mampu mentransmisikan 43,27 % saja pada panjang selang 25 cm. Seiring dengan pertambahan panjang media juga berdampak pada penurunan intensitas cahaya.

Penurunan transmitansi cahaya pada beberapa media pada penelitian ini lebih dipengaruhi oleh keberadaan partikel dalam air/aquades. Sesuai dengan teori bahwa keberadaan pelarut dalam fluida akan menurunkan kemampuannya dalam mentransmisikan cahaya. Kehadiran partikel yang bersifat absorber ternyata sangat mempengaruhi kemampuannya dalam mentransmisikan sinar.

**Tabel 1.** Kemampuan media dalam mentransmisikan cahaya

Keadaan media	Tegangan Sensor Akibat Laser		Transmitansi (%)	
	25 cm	50 cm	25 cm	50 cm
Kosong	4,16	4,17	100,00	100,00
Aquades	4,16	3,80	100,00	91,13
Gula 10%	3,62	2,63	87,02	63,07
Gula 20%	3,64	2,81	87,50	67,39
Gula 30%	2,54	2,06	61,06	49,40
Gula 40%	2,65	1,68	63,70	40,29
Gula 50%	2,95	2,25	70,91	53,96
Resin	1,8	1,1	43,27	26,38



**Gambar 1.** Kemampuan transmitansi media

**KESIMPULAN**

Berdasarkan pada hasil pembuatan, pengujian dan analisis terhadap pemandu cahaya yang sudah dibuat maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Model pemandu cahaya telah berhasil dibuat dengan menggunakan selang plastik yang berdiameter 1/4 inch dengan pengisi aquades, larutan gula dan resin. Hasil pengujian menunjukkan hasil yang kurang maksimal. Hal ini dikarenakan indeks bias pembungkus masih terlalu tinggi.
2. Model penerangan dengan memanfaatkan pemandu cahaya hanya dapat menjangkau jarak maksimal 50 cm. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan transmitansi yang cukup signifikan pada selang dengan panjang 50 cm.

**UCAPAN TERIMA KASIH**

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak yang sudah

membantu pelaksanaan sampai penyelesaian penelitian ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Rektor dan Ketua Lembaga Penelitian Universitas Jenderal Soedirman, atas dikeluarkannya surat keputusan (SK) tentang pengangkatan Tim Peneliti dan pendanaan penelitian
2. Dekan Fakultas MIPA yang telah memberikan dukungannya kepada tim peneliti.
3. Ketua Jurusan Fisika dan Laboratorium Elektronika Instrumentasi dan Geofisika yang telah memberikan fasilitas laboratorium.
4. Seluruh tim peneliti dan semua pihak yang terlibat dan telah bekerja sama untuk menyelesaikan penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] E.F. Nugrahani, K. Sekartedjo dan A.M. Hatta, Perancangan Sistem Transmisi Cahaya Matahari Melalui Serat Optik untuk Pencahayaan Ruangan, *Jurnal Teknik Pomits*. 1(1) (2012) 1–6.
- [2] T. Prawiranti, O.Handojo, Penerapan Produk Daylighting untuk Pencahayaan Ruang di Rumah Susun, *Jurnal Tingkat Sarjana Senirupa dan Desain*. 1 (2012) 1–10.
- [3] F. Elsiana, S.N. Ekasiwi, I.G. Antaryama, Daylighting Performance of Horizontal Light Pipe Branching on Open Plan Office Space, *Dimensi*. 42(2)(2015) 43–50.
- [4] Y. Sasaki, T. Katsuhiro, M. Shoichiro, A. Kazuhiko, S. Kunimas, Few-mode multicore fibers for long-haul transmission line, *Optical Fiber Technology*. 35 (2017) 19–27.
- [5] S. Pilz, H. Najafi, M. Ryser, V. Romano, Granulated Silica Method for the Fiber Preform Production, *Fibers* 5(24) (2017) 1–9.
- [6] P. Itxaso, A. Eneko A, R Federico, M. Asuncion IGD, G. Nekane, G. Olga, Z. Joseba, Fabrication and Characterization of Polymer Optical Fibers Doped with Perylene-Derivatives for Fluorescent Lighting Applications, *Fibers*. 5(28) (2017) 1–11.
- [7] Young dan Freedman, *Fisika Universitas*, Jilid 2, Erlangga, Jakarta, (2003).

## Penerapan Formalisme Euler-Lagrange dan Solusi Persamaan Geraknya dalam Perancangan Pompa Air dengan Kincir Sebagai Tenaga Penggerak

Jamrud Aminuddin<sup>\*1</sup>, Mukhtar Effendi<sup>1,2</sup>, Nurhayati<sup>3</sup>, Agustina Widiyani<sup>4</sup>, dan Sunardi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jenderal Soedirman, Jl. dr. Suparno 61 Karangwangkal-Purwokerto, Jawa Tengah, 53123, Indonesia.

<sup>2</sup>Pusat Penelitian dan Pengembangan Energi Baru dan Terbarukan, Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Universitas Jenderal Soedirman, Jl. dr. Suparno, Karangwangkal-Purwokerto, Jawa Tengah, 53123, Indonesia

<sup>3</sup>Department of Educational Physics, Faculty of Education and Teacher Training, Univ. Islam Negeri Ar-Raniry, Jl. Syekh Abdur Rauf Kopelma Darussalam, Banda Aceh, 23111, Indonesia.

<sup>4</sup>Department of Physics, Faculty of Science, Institut Technology Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Way Hui, Jati Agung-Lampung Selatan, 35365, Indonesia.

\*e-mail: jamrud.aminuddin@unsoed.ac.id

**Abstrak** – Sebagian besar pompa air untuk mengalirkan air dari posisi yang rendah ke posisi yang lebih tinggi menggunakan mesin sebagai tenaga penggerak. Roda kecil pada bagian pompa air digerakkan melalui hubungan antara beberapa roda ke mesin. Berdasarkan mekanisme tersebut, maka dalam studi ini dilakukan perancangan pompa air dengan kincir sebagai tenaga penggerak. Perancangan tersebut dilakukan dengan menerapkan formalisme Euler-Lagrange untuk menentukan persamaan gerak turbin dan roda lainnya untuk memutar roda kecil yang terhubung secara seporos dengan pompa. Solusi persamaan gerak tersebut ditentukan dengan metode Runge-Kutta orde empat untuk mengetahui konfigurasi dan dimensi roda-roda yang digunakan dilibatkan dalam sistem tersebut. Hasil perhitungan dengan metode Runge-Kutta dalam MATLAB menunjukkan bahwa konfigurasi yang optimal berdasarkan jari-jari roda adalah  $r_1 > r_2 > r_3$ . Parameter  $r_1$ ,  $r_2$ , dan  $r_3$  adalah jari-jari turbin (roda pertama), roda kedua, dan roda pada pompa (roda ketiga). Konfigurasi tersebut dapat dikembangkan dalam berbagai ukuran dengan perbandingan  $r_1=5:r_2=0,5:r_3=0,1$ .

**Kata kunci:** pompa air, kincir, Euler-Lagrange, Runge-Kutta, MATLAB

**Abstract** – Almost of hydrolic pump for lifting water from the lower to higher positions utilize a machine as a driving force. The small wheel on the hydrolic pump is rotated thought wheels connection to machine. From that mechanism, we design a hidrolic pump with a turbine as a driving force in this study. The designing is carried out by applying Euler-Lagrange formalism to determine equation of motion for turbine and other wheels for rotating a small wheel which is connected axially with pump. A numerical solution for the equation of motion is solved by means of the fourth order of Runge-Kutta method to retrieve configuration and dimension of some wheels which is employed on that system. The results of computational proces in MATLAB show that the optimal configuration based on wheels' radius is  $r_1 > r_2 > r_3$ . Here,  $r_1$ ,  $r_2$ , and  $r_3$  are radius of turbin (first wheel), second wheel, and wheel's pump (third wheel). The configuration is possible to develop in several size with ratio  $r_1=5:r_2=0.5:r_3=0.1$ .

**Key words:** hydrolic pump, turbine, Euler-Lagrange, Runge-Kutta, MATLAB

### PENDAHULUAN

Pompa merupakan peralatan yang sangat penting untuk mengalirkan air dari posisi yang lebih rendah ke posisi yang lebih tinggi. Pemanfaatan pompa pada sumur yang sangat dalam mutlak menggunakan tenaga mesin karena dibutuhkan putaran dengan kecepatan sangat besar. Untuk itu, dalam studi ini hanya terbatas pada perancangan pompa untuk mengangkat air dari posisi yang tidak terlalu dalam. Salah satu fenomena yang sering

ditemukan adalah proses pengangkatan aliran sungai ke posisi yang lebih tinggi untuk pengairan area sawah [1,2].

Pemanfaatan pompa air bertenaga mesin pada prinsipnya dapat dimodifikasi dengan pemanfaatan kincir air sebagai tenaga penggerak. Pompa ini merupakan hasil modifikasi pompa air yang digerakkan dengan tenaga mesin. Selain itu, pompa air ini juga dikembangkan berdasarkan prinsip kerja pompa yang memanfaatkan tekanan air dalam pipa untuk mengangkat air dari posisi lebih rendah

ke posisi yang lebih tinggi. Pompa yang memanfaatkan prinsip tekanan fluida untuk mengalirkan air dikenal dengan pompa hydram. Pompa hydram mampu bekerja dengan baik pada aliran air bertekanan tinggi sedangkan pada aliran bertekanan rendah tidak bekerja secara maksimal [3,4,5].

Dalam studi ini dikembangkan sebuah design pompa dengan kincir air sebagai tenaga penggerak berdasarkan kerja turbin air untuk memutar generator listrik pada pembangkit listrik tenaga air (PLTA) mikrohidro dan picohidro [6]. Kecepatan putaran kincir dan beberapa roda untuk memutar pompa air dianalisis berdasarkan kecepatan radial semua roda yang digunakan dalam sistem [2,6].

Konfigurasi roda dalam sistem ini, selanjutnya dianalisis dengan menentukan persamaan gerak radial melalui formalisme Euler-Lagrange dalam bentuk persamaan diferensial [7,8]. Sebuah persamaan diferensial dapat diselesaikan dengan metode numerik untuk mengetahui kondisi fisis yang paling mendekati keadaan sebenarnya [9,10].

Dalam studi ini, metode Runge-Kutta digunakan untuk menentukan solusi numerik persamaan gerak radial kincir dan roda untuk memutar pompa air. Secara teknik, metode ini diterapkan dengan metode yang sama dalam referensi [9,10,11]. Hasil perhitungan dengan metode Runge-Kutta dalam MATLAB digunakan untuk menentukan konfigurasi dan dimensi pompa air yang digerakkan dengan kincir kecepatan rendah.

**METODE**

Perancangan pompa air yang digerakkan dengan kincir dimulai dari penentuan konfigurasi 3 roda utama. Roda pertama (kincir) terhubung satu sumbu dengan roda kedua, sedangkan roda kedua dihubungkan dengan roda ketiga (roda pemutar pompa) menggunakan sabuk. Konfigurasi ini kemudian dinyatakan dalam bentuk Lagrangian ( $L$ ) dengan energi totalnya hanya terdiri atas energi kinetik ( $T$ ). Dengan pertimbangan bahwa jari-jari roda tetap selama perputarannya, maka energi potensial dianggap nol ( $V=0$ ). Selanjutnya, bentuk non konservatif persamaan Euler-Lagrange dinyatakan dalam bentuk:

$$\frac{\partial L}{\partial q_k} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} = Q_n \tag{1}$$

Pada persamaan (1), ada tiga parameter yang dilibatkan, yaitu koordinat umum ( $q_n$ ), waktu ( $t$ ), dan gaya eksternal ( $Q_n$ ). Dalam kasus ini gaya eksternal dianggap sebagai gaya penggerak roda [7]. Prinsip ini merupakan hasil modifikasi dari sistem penggerak roda pada sepeda [8].

Roda pertama sebagai representasi kincir digerakkan dorongan air dalam arah tegak lurus, sehingga dapat dinyatakan dalam bentuk torka,

$$\tau = Fr_{\perp} \tag{2}$$

Total gaya external dalam sistem ini merupakan selisih antara gaya dorong dan gaya kendala yang bergantung pada koefisien gesek kinetis dan nilai kecepatan angularnya dalam bentuk:

$$Q_n = Fr_i - \dot{\theta}_i b \tag{3}$$

Selanjutnya energi kinetik setiap roda dinyatakan secara umum dalam bentuk:

$$T_i = \frac{1}{2} I_i \dot{\theta}_i^2 \tag{4}$$

Di mana indeks- $i$  merupakan urutan roda dari 1 sampai 3.

Fungsi Lagrange dapat diturunkan dengan menggunakan energi kinetik pada persamaan (4) dan energi potensial yang dianggap nol ( $V=0$ ). Kondisi ini menghasilkan Lagrangian dalam bentuk:

$$L = \frac{1}{2} (I_1 \dot{\theta}_1^2 + I_2 \dot{\theta}_2^2 + I_3 \dot{\theta}_3^2) \tag{6}$$

Rotasi pada setiap roda dinyatakan sebagai:

$$\dot{\theta}_3 = \dot{\theta}_2 \left( \frac{r_2}{r_3} \right) = \dot{\theta}_1 \left( \frac{r_1}{r_2} \right) \tag{7}$$

Persamaan gerak sistem ini dirumuskan dengan menggunakan fungsi Lagrange pada persamaan (6) dan (7) pada persamaan (1) dengan mengasumsikan bahwa gaya external yang digunakan adalah  $Q_n$  pada persamaan (3). Prosedur ini menghasilkan

$$\frac{d^2 \dot{\theta}_i}{dt^2} = \frac{Fr_1 - \dot{\theta}_1 b}{\left[ I_1 + I_2 \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 + I_3 \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]} \tag{8}$$

dengan  $I$  adalah momen inersia roda-roda yang dilibatkan dalam perumusan, yaitu:

$$I = \left[ I_1 + I_2 \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 + I_3 \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right] \tag{9}$$

Solusi numerik persamaan (8) ditentukan dengan metode Runge-Kutta orde 4 dengan terlebih dahulu menamakan persamaan solusi umum dalam bentuk:

$$\dot{\theta}_1^{(i+1)} = \dot{\theta}_1^{(i)} + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (10)$$

Pada persamaan (10), konstanta  $k$  yang terdiri atas empat orde ditentukan dengan formula berikut:

$$k_1 = hf \left( t^{(i)}, \dot{\theta}_i^{(i)} \right), \quad (11)$$

$$k_2 = hf \left( t^{(i)} + \frac{h}{2}, \dot{\theta}_i^{(i)} + \frac{k_1}{2} \right), \quad (12)$$

$$k_3 = hf \left( t^{(i)} + \frac{h}{2}, \dot{\theta}_i^{(i)} + \frac{k_2}{2} \right), \quad (13)$$

$$k_4 = hf \left( t^{(i+1)}, \dot{\theta}_i^{(i)} + k_3 \right). \quad (14)$$

Parameter  $h$  merupakan hasil pembagian panjang terhadap jumlah interval waktu ( $N$ ) dalam bentuk:

$$h = \frac{t^{(n)} - t^{(i)}}{N} \quad (15)$$

Panjang interval waktu merupakan selisih antara waktu awal ( $t^{(i)}$ ) dan waktu akhir ( $t^{(n)}$ ). Algoritma metode Runge-Kutta tersebut diimplementasikan dalam MATLAB dengan menginput nilai tertentu untuk mendapatkan konfigurasi dan dimesi yang ideal [10].

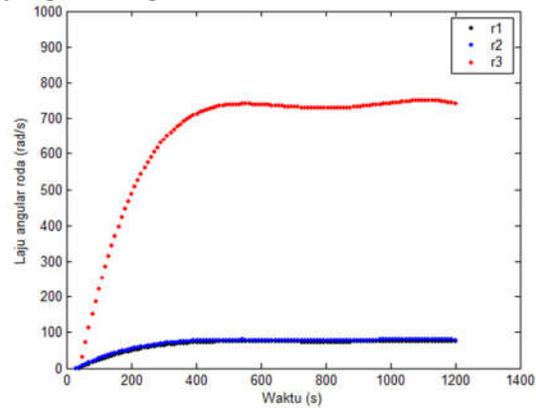
### HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan laju angular roda pertama, kedua, dan ketiga yang telah dilakukan dalam MATLAB dinyatakan dalam bentuk grafik antara ketiganya. Program dijalankan dengan menginput gaya dorong air terhadap kincir (roda pertama), gaya kendala dalam bentuk koefisien gesek kinetis, jari-jari semua roda, momen inersia semua roda, dan koefisien gesek kinetik sistem. Nilai-nilai parameter yang telah dicobakan didasarkan pada tingginya laju angular roda yang memutar pompa meskipun kincir mendapatkan gaya dorong yang rendah.

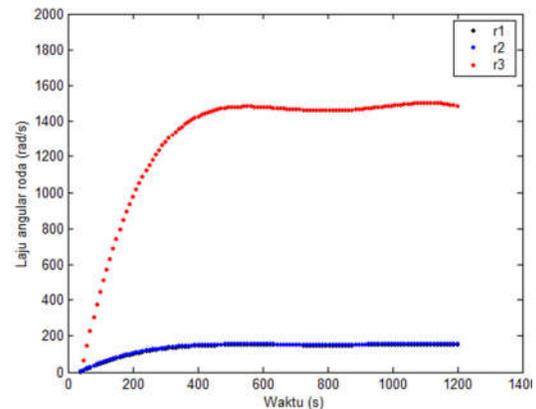
Dari perhitungan dalam MATLAB yang telah dilakukan dengan mencoba beberapa nilai secara acak berdasarkan konfigurasi pada referensi [2,6], diketahui bahwa sistem akan bekerja secara optimal dimensi masing-masing roda pertama, kedua, dan ketiga adalah  $r_1=0,5$ ,  $r_2=0,05$ , dan  $r_3=0,01$  m. Selanjutnya, inersia masing-masing roda pertama, kedua, dan ketiga adalah  $I_1=0,05$ ,  $I_2=0,04$ , dan  $I_3=0,03$   $\text{kgm}^2$  dengan nilai koefisien gesek kinetik sebagai representasi gaya kendala adalah 0,05 N. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai-nilai tersebut mampu memutar roda yang terhubung dengan pompa dengan laju anglar yang lebih

tinggi dari yang lain meskipun didorong dengan gaya 10 N.

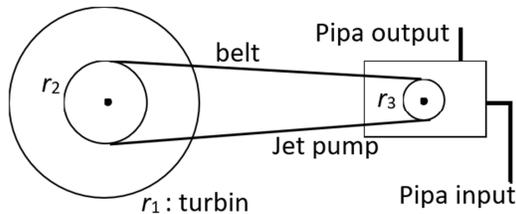
Perubahan laju angular semua roda yang dilibatkan dalam sistem penggerak diperlihatkan pada Gambar 1 dan 2. Pada saat gaya dorong sebesar 10 N, roda pertama dan kedua mempunyai laju angular sekitar 100 rad/s sedangkan roda ketiga yang menggerakkan pompa rata-rata antara 700-800 rad/s. Jika gaya dorong yang diberikan sebesar 10 N dengan dimensi semua roda sama dengan parameter pada Gambar 1, maka laju angular akan meningkat menjadi dua kali lipat sebagaimana yang terlihat pada Gambar 2.



**Gambar 1.** Perubahan laju angular setiap waktu dengan dimensi masing-masing roda pertama, kedua, dan ketiga adalah  $r_1=0,5$ ,  $r_2=0,05$ , dan  $r_3=0,01$  m yang didorong dengan gaya 10 N.



**Gambar 2.** Perubahan laju angular setiap waktu dengan dimensi masing-masing roda pertama, kedua, dan ketiga adalah  $r_1=0,5$ ,  $r_2=0,05$ , dan  $r_3=0,01$  m yang didorong dengan gaya 20 N.



**Gambar 3.** Konfigurasi dan dimensi roda penggerak pompa air dengan perbandingan  $r_1=5:r_2=0,5:r_3=0,1$ .

Berdasarkan analisis numerik dengan dimensi roda untuk menghasilkan perubahan laju angular pada Gambar 1 dan 2, maka diperoleh konfigurasi roda dalam bentuk Gambar 3. Pompa dengan konfigurasi seperti pada Gambar 3 digerakkan gaya dorong air untuk memutar kincir air. Putaran kincir air (roda pertama) yang terhubung secara eporos dengan roda kedua selanjutnya akan memutar roda ketiga yang terhubung secara serantai menggunakan belt. Putaran roda ketiga yang terhubung secara seporos dengan komponen bagian dalam pompa yang berputar untuk mengisap dan membuang air. Konfigurasi tersebut dapat dikembangkan dalam berbagai ukuran dengan perbandingan  $r_1=5:r_2=0,5:r_3=0,1$ . Besaran lainnya yang memerlukan analisis lebih lanjut adalah momen inersia yang terkait dengan massa dan kepadatan semua roda.

### KESIMPULAN

Penerapan formalisme Euler-Lagrange dan metode Runge-Kutta dalam perancangan pompa air menghasilkan konfigurasi dan dimensi sistem penggerakannya. Hasil perhitungan dalam MATLAB menunjukkan bahwa konfigurasi yang optimal berdasarkan jari-jari roda adalah  $r_1 > r_2 > r_3$ . Parameter  $r_1$ ,  $r_2$ , dan  $r_3$  adalah jari-jari turbin (roda pertama), roda kedua, dan roda pada pompa (roda ketiga). Konfigurasi tersebut dapat dikembangkan dalam berbagai ukuran dengan perbandingan  $r_1=5:r_2=0,5:r_3=0,1$ .

### UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih atas dana kegiatan dari LPPM UNSOED pada skim audiovisualisasi IPTEKS, Tahun Anggaran 2013 dengan Nomor Kontrak: Kept.2267/UN23.10/PM/2013 Tanggal 6 Mei 2013.

### PUSTAKA

- [1] Y.A. Cahyanta dan A.W. Mandagi, The Effect of Waste Valve Stroke Length on The Hydraulic Ram Pump Performance, *International Journal of Engineering and Science* 2(4) (2011) 56-60.
- [2] J. Aminuddin Nurhayati, and Agustina W., Modifikasi Pompa Air dengan Kincir Kecepatan Rendah sebagai Tenaga Penggerak, *Elkawnie, Journal of Islamic Science and Technology* 1(2) (2019).
- [3] Suyatno, Rancang Bangun Pompa Hidraulik Ram (HYDRAM), *Jurnal DINAMIS* 2(12) (2008) 5-10.
- [4] A. Suryawan, Adhi A., dan Suarda I.M., Kajian Eksperimen Pengaruh Akselerasi Terhadap Performansi Pompa Hydram, *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin CAKRAM* 3(2) (2009) 10-15.
- [5] I.M. Suarda, Perancangan dan Pengujian Model Sistem Hydrum Penggerak Pompa Torak dengan Dua Sumber Aliran: Air Kotor dan Air Bersih. Makalah Utama. Disampaikan pada Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) Ke-9, Palembang, 13-15 Oktober 2010.
- [6] H. Soekarno, Anggono T. dan A. Heriansyah, A Basic Component in Designing of Micro Hydropower, *Journal of P3TEK* 1(1) (2002) 8-12.
- [7] J.R. Taylor, *Classical Mechanics*. 4th Edition, University Science Books, USA, 2005.
- [8] J.P. Meijaard, J.M. Papadopoulos, A. Ruina, and A.L. Schwab, Linearized Dynamics Equation for the Balance and Steer of a Bicycle, *Proc. R. Soc. A* 463 (2007) 1-63.
- [9] J. Naber, A Runge-Kutta discontinuous-Galerkin Level-Set Method for Unsteady Compressible Two-Fluid Flow, REPORT MAS-E0601, Centrumvoor Wiskunde en Informatica, Amsterdam, 2006.
- [10] J. Aminuddin, *Dasar-dasar Fisika Komputasi Menggunakan Matlab*, Gaya Media, Yogyakarta, 2008.
- [11] K.V. Alexander, and E.P. Giddens, Optimum Penstocks for Low Head Micro Hydro Schemes, *Renewable Energi* 33(3) (2008) 507-519.

## Tinjauan Mengenai Massa Boson Tera Netral $Z'$ dalam Varian Model Simetri Kiri-Kanan

Akmal Ferdian\* dan R. Farzand Abdullatif

Program Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman

Jalan Dr. Suparno No.61 Karangwangkal Purwokerto Jawa Tengah

\*e-mail: aferdian@unsoed.ac.id

**Abstrak-** Model simetri kiri-kanan sebagai perluasan (ekstensi) dari model standar fisika partikel telah lama dikenal di kalangan fisikawan. Hingga saat ini telah terdapat banyak variasi dari model simetri kiri-kanan. Salah satu ciri khas dari model ini adalah adanya partikel baru yang tidak terdapat dalam model standar yaitu boson tera netral  $Z'$  atau  $Z_R$ . Partikel  $Z'$  memberikan aspek fenomenologis yang dapat diuji dalam eksperimen yang ada saat ini. Parameter yang menjadi kunci adalah massa  $Z'$ , terkait dengan peluruhannya menjadi partikel dalam model standar. Dalam artikel ini akan dilakukan tinjauan mengenai massa  $Z'$  di dalam berbagai varian model simetri kiri-kanan. Massa  $Z'$  untuk masing-masing model bergantung pada pendekatan terkait perbandingan harga harap vakum Higgs sektor kiri ( $v_L$ ) dan kanan ( $v_R$ ).

**Kata Kunci:** simetri kiri-kanan, massa  $Z'$ , perluasan model standar

*Abstract – The left-right symmetry model as an extension of standard model of particle physics has long been known among physicists. Until now there have been many variations of the left-right symmetry model. One characteristic of this model is the presence of a new particle that is not present in the standard model, namely the neutral gauge boson  $Z'$  or  $Z_R$ .  $Z'$  provides phenomenological aspects that can be tested in current experiments. The key parameter is the mass of  $Z'$ , related to its decay into particles in the standard model. In this article a review of  $Z'$  mass will be carried out in variants of the left-right symmetry model. The mass of  $Z'$  in each model depends on an approximation related to the ratio between vacuum expectation value of left Higgs sector ( $v_L$ ) and right sector ( $v_R$ ).*

**Key words:** left-right symmetry,  $Z'$  mass, extension of standard model

### PENDAHULUAN

Model standar fisika partikel (*Standard Model*, SM) telah lama dipercaya sebagai model yang harus diperluas karena tidak dapat menjelaskan berbagai hal seperti massa neutrino, asimetri partikel-anti partikel, big bang nucleosynthesis, dark matter dan dark energy. Salah satu perluasan model standar adalah model simetri kiri kanan (*Left-Right Symmetry*, LRS), yang berangkat dari ketiadaan arus lemah kanan pada SM [1]. Dengan mengasumsikan keberadaannya, diperoleh model simetri kiri kanan yang menjaga kelestarian paritas. Telah banyak varian dari model ini yang diajukan sebagai perluasan SM, di antaranya mulai dari bentuk awalnya yang mengandung bidublet [2], model yang melakukan duplikasi partikel SM dengan menambahkan partikel partner *chiral* [3], [4], model dengan penambahan simetri  $U(1)$  baru [5], dan juga model dual LRS [6].

Seluruh model LRS itu memiliki partikel boson tera netral (neutral gauge boson) baru jika dibandingkan dengan SM. Dalam SM boson

tera netral adalah boson  $Z$ , sedangkan dalam model LRS selain boson  $Z$  juga akan diperoleh boson  $Z'$  atau dalam beberapa literatur disebut sebagai boson  $Z_R$  karena terkait dengan sektor kanan dari model LRS. Boson  $Z'$  memiliki peran tersendiri dalam seluruh varian model LRS karena memiliki implikasi fenomenologis yang sangat penting, dan menjadi salah satu penanda khas (signature) untuk pengecekan kebenaran suatu model ketika diuji dalam eksperimen di berbagai *collider* yang ada di dunia [7]. Konsekuensi kehadiran  $Z'$  telah dibahas secara umum dalam sebuah *review* yang sangat lengkap di masa lalu [8]. Massa boson  $Z'$  adalah parameter yang terkait erat dengan deteksi berbagai fenomena baru yang tidak ada dalam SM. Oleh karena itu penting untuk dilakukan tinjauan mengenai mekanisme pembentukan massa boson  $Z'$  dalam berbagai varian model LRS, termasuk beberapa model terbaru.

**DESKRIPSI MODEL LRS**

**A. Model LRS secara umum**

Model LRS mengakomodasi simetri kiri kanan, secara umum grup tera (gauge group) model ini minimal mengandung simetri berikut:

$$SU(3) \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1) \quad (1)$$

Grup tera ini berbeda dengan grup tera SM yang hanya mengakomodasi arus lemah kiri, yaitu  $SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)$ . Varian dari model LRS seluruhnya memiliki grup tera pada persamaan (1), namun kemudian dapat ditambah dengan grup U(1) baru, simetri baru seperti simetri  $Z_2$ , penambahan bilangan kuantum baru atau variasi pada sektor Higgs. Variasi tersebut menghasilkan model-model yang memiliki aspek fenomenologis yang kaya. Namun demikian pembangkitan massa boson tera dalam seluruh model diberikan oleh mekanisme yang sama, disebabkan oleh simetri yang ada dalam setiap model LRS. Model LRS memiliki 2 nilai harap vakum Higgs yang berbeda, yaitu  $v_L$  dan  $v_R$ , sedangkan dalam SM hanya ada satu nilai harap vakum Higgs yaitu  $v_L$ . Nilai  $v_L$  diasumsikan jauh lebih kecil dibanding  $v_R$  karena sampai saat ini dalam eksperimen belum terdeteksi arus lemah kanan. Nilai konstanta kopling dalam model ini juga ada tiga, yaitu  $g_L$  (kopling dalam SM),  $g_R$  (kopling terkait sektor kanan) serta  $g'$  (kopling sektor  $U(1)$ ). Karena asumsi bahwa sektor kiri dan kanan simetris maka  $g_L = g_R = g$ . Seluruh model LRS menyatakan bahwa dalam energi tinggi paritas bersifat simetris antara kiri dan kanan, namun dalam energi rendah terjadi perusakan simetri sehingga hanya tersisa arus lemah kiri seperti yang terdapat dalam SM [9].

**B. Pembangkitan massa boson tera dalam model LRS**

Massa boson tera dalam model LRS diberikan oleh suku Lagrangian berikut:

$$\mathcal{L}_{L,R} = \left| \partial_\mu - \sqrt{\frac{1}{2}} \left( \frac{-i}{2} g \tau \cdot \mathbf{W}_L + \frac{i}{2} g' B_\mu \right) X_L \right|^2 + \left| \partial_\mu - \sqrt{\frac{1}{2}} \left( \frac{-i}{2} g \tau \cdot \mathbf{W}_R - \frac{i}{2} g' B_\mu \right) X_R \right|^2 \quad (2)$$

Dengan  $X_L$  dan  $X_R$  adalah medan skalar Higgs kiri dan kanan yang memiliki nilai harap vakum  $v_L$  dan  $v_R$ .

Jika dimasukkan nilai harap vakum maka diperoleh persamaan berikut:

$$\left( \frac{1}{2} g v_L \right)^2 W_{\mu L}^+ W_L^{\mu -} + \left( \frac{1}{2} g v_R \right)^2 W_{\mu R}^+ W_R^{\mu -} + \frac{1}{2} (W_{\mu L}^3 W_{\mu R}^3 B_\mu) M_{WB} \begin{pmatrix} W_L^{3\mu} \\ W_R^{3\mu} \\ B_\mu \end{pmatrix} \quad (3)$$

Suku pertama dan kedua memberikan massa boson tera bermuatan, yaitu:

$$M_{W_L}^2 = \frac{1}{4} g^2 v_L^2 \text{ dan } M_{W_R}^2 = \frac{1}{4} g^2 v_R^2 \quad (4)$$

Sedangkan suku ketiga memberikan massa boson tera netral, dengan  $M_{WB}$  diberikan oleh

$$M_{WB} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} g^2 v_L^2 & 0 & -g g' v_L^2 \\ 0 & g^2 v_R^2 & -g g' v_R^2 \\ -g g' v_L^2 & -g g' v_R^2 & g'^2 (v_R^2 + v_L^2) \end{pmatrix} \quad (5)$$

Diagonalisasi matriks  $M_{WB}$  akan memberikan *eigenvalues* yang merupakan massa foton A, boson tera netral Z, dan boson tera netral Z' [2]. Dalam SM matriks boson tera netral hanya berukuran 2x2 sehingga hanya memberikan massa A dan Z. Proses pendagonalisasian matriks  $M_{WB}$  dan penulisannya dalam basis massa boson tera yang akan menentukan nilai spesifik massa Z'. Terdapat beberapa pendekatan yang dilakukan dalam mendagonalisasikan  $M_{WB}$ , lebih spesifik yaitu pendekatan dalam menentukan nilai dari persamaan berikut:

$$M_{Z'}^2 = \frac{1}{2} g^2 v_L^2 + \frac{1}{2} g^2 v_R^2 + \frac{1}{2} g'^2 v_L^2 + \frac{1}{2} g'^2 v_R^2 + \frac{1}{2} (g^4 v_L^4 - 2g^4 v_L^2 v_R^2 + 2g^2 g'^2 v_L^4 - 4g^2 v_L^2 g'^2 v_R^2 + g^4 v_R^4 + 2g^2 v_R^4 g'^2 + g'^4 v_L^4 + 2g'^4 v_L^2 v_R^2 + g'^4 v_R^4)^{1/2} \quad (6)$$

Tampak bahwa nilai  $M_{Z'}^2$ , bergantung pada beberapa variabel, sehingga ada beberapa variasi dalam mengambil pendekatan nilai massa Z'.

**MASSA Z' DALAM VARIAN MODEL LRS**

**A. Model LRS dengan Bidublet**

Varian model LRS yang paling awal memiliki bidublet Higgs dalam sektor Higgs [2], [9]. Model ini memiliki grup tera seperti dalam persamaan (1), dan fermion dalam model ini memiliki pasangan di sektor kanan termasuk neutrino. Model ini memiliki satu bidublet Higgs untuk membangkitkan massa partikel, yang juga menghubungkan sektor kiri dan kanan, yaitu

$$\langle \varphi \rangle = \begin{pmatrix} k & 0 \\ 0 & k' \end{pmatrix} \quad (7)$$

Selain bidublet, juga terdapat 2 medan Higgs, masing-masing untuk sektor kiri dan kanan

$$\langle \chi_L \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v_L \end{pmatrix}, \quad \langle \chi_R \rangle = \begin{pmatrix} v_R \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Struktur medan Higgs seperti ini setelah mengalami perusakan simetri (*Symmetry Breaking*, SB) akan memberikan massa  $Z'$  dalam bentuk yang hampir sama dengan persamaan (6). Pendekatan yang dilakukan dalam model ini telah dijelaskan dalam pustaka [10], yaitu dengan mengambil kuadrat sempurna dari bentuk akar dalam persamaan (6) lalu mengambil batasan bahwa  $(k^2 + k'^2) \ll v_{R,L}^2$ . Nilai massa  $Z'$  diberikan oleh

$$\begin{aligned} M_{Z'}^2 &\cong \frac{1}{2}(g^2 + g'^2)(v_L^2 + v_R^2) \\ &\quad - \frac{1}{2}g^2v_L^2 \left(1 + \frac{g'^2}{g^2+g'^2}\right) \\ &\cong \frac{1}{2}g^2 \left(\frac{g^2+g'^2}{g^2}\right)v_R^2 - \frac{1}{2}g'^2 \left(1 + \frac{g^2}{g^2+g'^2}\right)v_L^2 \end{aligned} \quad (9)$$

dengan mendefinisikan sudut  $\theta$  yang diberikan oleh

$$\tan \theta = \frac{g'}{\sqrt{g^2+g'^2}} \quad (10)$$

dan dalam batas  $v_R^2 > v_L^2$  maka diperoleh hubungan berikut

$$M_{Z'} = \frac{M_{W_R} \cos \theta}{\sqrt{\cos 2\theta}} = v_R \sqrt{g^2 + g'^2} \quad (11)$$

dengan  $M_{W_R}$  diberikan oleh persamaan (4). Massa  $Z'$  diberikan oleh parameter  $\theta$ , namun bentuknya berbeda dengan bentuk yang dimiliki oleh  $Z$  dalam SM. Tampak bahwa nilai massa  $Z'$  diberikan oleh harga harap vakum  $v_R$ . Di dalam model dengan bidublet semacam ini akan terjadi pencampuran (*mixing*) orde pertama/*tree level* antara boson tera bermuatan  $W_R$  dan  $W_L$ , yang sampai saat ini belum terdeteksi. Ini menjadi faktor yang membuat penggunaan

bidublet ditinggalkan dalam model LRS lainnya.

### B. Model LRS dengan penggandaan partikel SM

Model LRS yang lain adalah model yang menggandakan isi/konten partikel dalam SM dengan menambahkan pasangan menggunakan simetri paritas. Salah satu model dengan konten partikel semacam ini diajukan oleh grup Coutinho dan de Almeida ([2] dan [3]). Grup tera tetap seperti dalam persamaan (1) dan sektor Higgs dalam model ini terdiri dari 2 dublet  $\chi_L$  dan  $\chi_R$  serta 3 singlet skalar  $s_D, s_{M_L}$ , dan  $s_{M_R}$ . Bidublet dalam model ini sifatnya opsional dan dapat dipilih nilai harga harap vakum yang sangat kecil untuk bidublet. Konsekuensi dari pemilihan sektor Higgs semacam ini adalah *mixing* antara boson tera bermuatan tidak terjadi dalam orde pertama, *mixing* akan terjadi dalam orde berikutnya yaitu dalam *loop*, sehingga nilainya akan sangat kecil. Dalam model ini juga digunakan simetri  $Z_2$  guna mencegah peluruhan yang tidak diinginkan. Dengan parameterisasi perbandingan harga harap vakum kiri dan kanan diberikan oleh  $\omega = v_L/v_R$  maka massa  $Z'$  sebagai pendekatan nilai persamaan (6) diberikan oleh

$$M_{Z'}^2 = \frac{1}{4}v_R^2 g^2 \tan^2 \theta_W \tan^2 \beta \left(1 + \frac{\omega^2 \sin^2 2\beta}{4 \sin^2 \theta_W}\right) \quad (12)$$

dengan sudut *mixing* diberikan oleh

$$\sin^2 \theta_W = \frac{g^2 g'^2}{g^4 + 2g^2 g'^2}, \quad \sin^2 \beta = \frac{g'^2}{g^2 + g'^2} \quad (13)$$

Tampak bahwa dalam model ini massa  $Z'$  memiliki kontribusi dari sektor kiri yaitu dari harga harap vakum Higgs kiri  $v_L$ . Nilai tersebut masuk di dalam koreksi di dalam persamaan (12), yaitu di dalam suku  $\omega^2$ . Batasan dalam model ini menyatakan bahwa nilai minimum  $v_R > 30 v_L$ . Dalam model ini seluruh fermion memperoleh massa bukan melalui pembangkitan massa standar dalam SM, namun melalui mekanisme *seesaw* [11] dan neutrino memperoleh massa melalui mekanisme *double seesaw*. Massa  $Z'$  menjadi salah satu parameter penting ketika menentukan penanda/*signature* di LHC (*Large Hadron Collider*, di CERN) untuk model ini. Kemungkinan peluruhan dan *branching ratios* untuk  $Z'$  telah didiskusikan untuk beberapa rentang  $M_{Z'}$  dan diprediksi adanya peluruhan  $Z' \rightarrow$  neutrino yang dapat memberikan penanda yang jelas untuk  $Z'$  dalam

model ini di LHC. Namun model ini memiliki kelemahan yaitu massa partikel yang dibangkitkan melalui *seesaw* tidak akan memiliki kopling yang proporsional terhadap massa, yang tidak sesuai dengan hasil eksperimen terbaru [12].

### C. Model LRS dengan penambahan bilangan kuantum

Model LRS dapat diberi tambahan simetri baru berupa simetri  $Z_2$  seperti model yang dibahas sebelum ini atau penambahan bilangan kuantum baru untuk mencegah terjadinya fenomena yang tidak diinginkan (peluruhan proton, pelanggaran konservasi bilangan lepton, dan lainnya). Salah satu model yang menggunakan penambahan bilangan kuantum baru adalah dengan menambahkan bilangan kuantum  $F$  [6]. Grup tera tetap diberikan oleh persamaan (1), serta sektor Higgs yang terdiri dari 2 dublet  $\chi_L$  dan  $\chi_R$  ditambah 2 leptoquark  $\rho$  dan  $\eta$ . Leptoquark digunakan untuk memfasilitasi peluruhan partikel sektor kanan. Selain itu di dalam model ini diperkenalkan bilangan kuantum baru  $F$  dengan nilai 1 untuk fermion dan 0 untuk partikel skalar. Bilangan  $F$  ini mencegah munculnya suku massa Majorana untuk neutrino, sehingga dalam model ini seluruh neutrino adalah neutrino Dirac. Massa  $Z'$  diberikan oleh

$$M_{Z'}^2 = \frac{1}{8} v_R^2 (g^2 + g'^2) \times \left( (1 + \omega^2)^2 - (1 - \omega^2)^2 + \frac{4\omega^2 g'^4}{(g^2 + g'^2)^2} \right)^{1/2} \cong \frac{1}{4} v_R^2 g^2 \frac{\tan^2 \theta_W}{\sin^2 2\beta} (1 + \omega^2 \sin^4 2\beta) \quad (14)$$

dengan sudut mixing diberikan oleh persamaan (13) dan  $\omega = v_L/v_R$ . Tampak terdapat perbedaan antara persamaan (12) dan (14), koreksi dari  $\omega$  memiliki nilai berbeda, begitupun untuk faktor dari sudut mixing  $\beta$ . Hal ini diakibatkan oleh pendekatan yang berbeda dalam mengambil suku binomial untuk  $\omega$  [13]. Model ini memiliki aspek fenomenologis yang mirip dengan model sebelumnya, sehingga diperkirakan untuk partikel  $Z'$  akan memiliki karakteristik yang sama,  $Z'$  akan menjadi penanda melalui peluruhan  $Z' \rightarrow$  neutrino di LHC. Namun di dalam model ini seluruh partikel mengalami pembangkitan massa melalui kopling Yukawa standar seperti dalam

SM, sehingga tidak memiliki permasalahan dengan proporsionalitas massa dengan kopling. Hanya massa neutrino kanan di dalam model ini yang dibangkitkan melalui mekanisme *seesaw* tipe Dirac. Model ini juga mengambil nilai harga harap vakum yang sangat kecil untuk bidublet sehingga tidak terjadi mixing antara boson tera bermuatan dalam orde pertama. Dengan menggunakan beberapa batasan, model ini juga mampu menjawab asimetri partikel-antipartikel melalui proses baryogenesis yang dialami leptoquark, serta dapat memenuhi batasan dari Big Bang Nucleosynthesis. Hanya saja di dalam model ini tidak terdapat partikel yang dapat menjadi kandidat materi gelap (dark matter).

### D. Model LRS dengan penambahan grup tera

Model LRS dapat diberi tambahan grup tera baru sehingga bentuknya tidak lagi sama dengan persamaan (1). Varian model LRS ini salah satunya diajukan oleh Neves, Helayel-Neto, Mohapatra dan Okada [5]. Grup tera dalam model ini adalah

$$SU(3) \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L} \times U(1)_X \quad (15)$$

Dalam model ini terdapat dua grup  $U(1)$ , yang pertama adalah grup yang sama seperti dalam model LRS lain maupun dalam SM (notasi B-L digunakan untuk menerangkan grup ini terkait dengan muatan baryon dan lepton), sedangkan grup  $U(1)$  kedua adalah grup baru yang diperkenalkan sebagai  $U(1)$  portal. Dengan memperkenalkan grup tersebut, akan diperoleh partikel baru berupa singlet fermion yang dapat menjadi kandidat materi gelap.

Dalam model ini terdapat 4 medan Higgs dan 3 diantaranya adalah multiplet, yaitu

$$\phi = \begin{pmatrix} \phi_1^0 & \phi_2^+ \\ \phi_1^- & \phi_2^0 \end{pmatrix}, \quad \Delta_L = \begin{pmatrix} \frac{\Delta_L^+}{\sqrt{2}} & \Delta_L^{++} \\ \Delta_L^0 & -\frac{\Delta_L^+}{\sqrt{2}} \end{pmatrix},$$

$$\Delta_R = \begin{pmatrix} \frac{\Delta_R^+}{\sqrt{2}} & \Delta_R^{++} \\ \Delta_R^0 & -\frac{\Delta_R^+}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (16)$$

dan ditambah satu medan Higgs singlet  $\Xi$  yang memiliki nilai harga harap vakum yang merusak

simetri  $U(1)_X$ . Nilai harga harap vakum untuk masing-masing medan adalah

$$\begin{aligned} \langle \phi_1^0 \rangle &= \frac{v_1}{\sqrt{2}}, \quad \langle \phi_2^0 \rangle = \frac{v_2}{\sqrt{2}}, \quad \langle \Delta_L^0 \rangle = \frac{v_L}{\sqrt{2}} \\ \langle \Delta_R^0 \rangle &= \frac{v_R}{\sqrt{2}}, \quad \langle \Xi \rangle = \frac{u}{\sqrt{2}} \end{aligned} \quad (17)$$

Dipilih hubungan antara nilai-nilai tersebut supaya bisa memberikan hasil seperti dalam SM, yaitu  $v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + v_L^2} = 246 \text{ GeV}$ . Dengan sektor Higgs dan grup tera seperti ini, maka matriks massa boson tera netral tidak lagi diberikan oleh persamaan (5), namun berbentuk matriks  $4 \times 4$ . Diagonalisasi matriks tersebut memberikan 2 partikel yang diidentifikasi sebagai foton dan boson  $Z$  serta 2 partikel baru yaitu  $Z'$  dan  $X$ . Massa  $Z'$  dalam model ini diberikan oleh

$$M_{Z'} \cong v_R \sqrt{g^2 + g_{BL}^2} \quad (18)$$

di mana  $g_{BL}$  adalah konstanta kopling  $U(1)_{B-L}$  yang identik dengan  $g'$  dalam model-model sebelumnya. Notasi tersebut digunakan untuk membedakan antara kopling  $g_{BL}$  dan  $g_X$  milik  $U(1)_X$ . Persamaan (18) memberikan nilai yang persis sama dengan persamaan (11), karena dianggap nilai  $v_R \gg v_L$ . Peluruhan  $Z'$  telah dihitung dan diperiksa kesesuaiannya dengan eksperimen ATLAS di LHC, melalui proses resonansi dengan keadaan akhir berupa dilepton ( $e^+e^- + \mu^+\mu^-$ ). Namun dengan adanya partikel  $X$  yang juga merupakan boson tera netral, maka peluruhan  $Z'$  akan memiliki faktor koreksi yang melibatkan proses peluruhan  $X$ . Di dalam model ini juga telah diperiksa kemungkinan partikel  $X$  menjadi materi gelap dan kesesuaiannya dengan eksperimen yang telah maupun akan berjalan (*High Luminosity LHC*, LUX ZEPLIN dan XENON1T).

### KESIMPULAN

Model LRS sebagai perluasan dari SM telah banyak diteliti karena memiliki aspek fenomenologis yang kaya. Ekstensi SM ke model LRS memberi konsekuensi adanya partikel boson tera netral baru  $Z'$ . Nilai massa  $Z'$  adalah parameter yang penting untuk mendeteksi sektor kanan melalui proses peluruhan  $Z'$ . Diagonalisasi matriks massa  $3 \times 3$  untuk memperoleh  $M_{Z'}$  telah memberikan nilai yang berbeda karena penggunaan pendekatan yang berbeda untuk tiap parameter yang ada di dalamnya. Secara umum nilai  $M_{Z'}$  dominan ditentukan oleh harga harap vakum Higgs kanan

$v_R$ . Model LRS awal dengan bidoublet memberikan nilai  $M_{Z'} = \frac{M_{WR} \cos \theta}{\sqrt{\cos 2\theta}} = v_R \sqrt{g^2 + g'^2}$ , yang sama dengan nilai dalam model dengan tambahan  $U(1)_X$ . Nilai tersebut diperoleh dengan pemilihan  $v_R \gg v_L$ . Untuk model dengan penggandaan partikel SM dan penggunaan *seesaw* untuk pembangkitan massa seluruh partikel diperoleh nilai  $M_{Z'}^2 = \frac{1}{4} v_R^2 g^2 \tan^2 \theta_W \tan^2 \beta \left( 1 + \frac{\omega^2 \sin^2 2\beta}{4 \sin^2 \theta_W} \right)$ . Nilai ini diperoleh dengan melakukan faktorisasi parameter  $\omega$ , sehingga dalam model ini nilai massa  $Z'$  memiliki faktor penyumbang dari harga harap vakum Higgs kiri  $v_L$ . Untuk model dengan penambahan bilangan kuantum baru, diperoleh nilai  $M_{Z'}^2 = \frac{1}{4} v_R^2 g^2 \frac{\tan^2 \theta_W}{\sin^2 2\beta} (1 + \omega^2 \sin^4 2\beta)$ . Tampak bahwa juga terdapat faktor  $v_L$  di dalamnya, namun karena digunakan pendekatan binomial yang berbeda maka diperoleh faktor yang berbeda jika dibandingkan model sebelumnya. Masing-masing model memiliki aspek fenomenologis yang berbeda dan memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing.

### PUSTAKA

- [1] J. C. Pati and A. Salam, Lepton number as the fourth 'color', *Phys. Rev. D* 10(1) (1974) 275–289.
- [2] G. Senjanović, Spontaneous breakdown of parity in a class of gauge theories, *Nucl. Physics, Sect. B* 153(C) (1979) 334–364.
- [3] Y. A. Coutinho, J. A. Martins Simões, and C. M. Porto, Fermion masses in a model for spontaneous parity breaking, *Eur. Phys. J. C* 18(4) (2001) 779–784.
- [4] F. M. L. De Almeida et al., Double seesaw mechanism in a left-right symmetric model with TeV neutrinos, *Phys. Rev. D - Part. Fields, Gravit. Cosmol.* 81(5) (2010) 1–7.
- [5] M. J. Neves, J. A. Helayél-Neto, R. N. Mohapatra, and N. Okada, Minimally extended left-right symmetric model for dark matter with  $U(1)$  portal, *J. High Energy Phys.* 2018 (12) (2018).
- [6] A. S. Adam, A. Ferdiyan, and M. Satriawan, A New Left-Right Symmetry Model, Unpublished, no. arXiv:1903.03370, (2019).

- [7] S. Chakdar, K. Ghosh, S. Nandi, and S. K. Rai, Collider signatures of mirror fermions in the framework of a left-right mirror model, *Phys. Rev. D - Part. Fields, Gravit. Cosmol.* 88 (9) (2013) 1–16.
- [8] P. Langacker, The physics of heavy  $Z'$  gauge bosons, *Rev. Mod. Phys.* 81 (3) (2009) 1199–1228.
- [9] R. N. Mohapatra and G. Senjanović, Neutrino masses and mixings in gauge models with spontaneous parity violation, *Phys. Rev. D* 23(1) (1981) 165–180.
- [10] A. Ferdiyan, Cara Baru Pembentukan Massa Dalam Model Simetri Kiri-Kanan, Skripsi, Universitas Gadjah Mada, 2010.
- [11] M. Gell-Mann, P. Ramond, and R. Slansky, "Supergravity," in *Complex Spinors and Unified Theories* (1979) 315.
- [12] M. Aaboud, Cross-section measurements of the Higgs boson decaying to a pair of tau leptons in proton–proton collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV with the ATLAS detector, *Phys. Rev. D* 99(7) (2019) 104.
- [13] A. S. Adam, Bariogenesis dalam Model Cermin CP, Tesis, Universitas Gadjah Mada, 2013.

## Pola Kurva Isodosis Dari Penyinaran Berkas Profil Datar pada Kanker Payudara Dengan Teknik Tangensial Menggunakan MCNPX

Aat Maftuhaturun<sup>1</sup>, Aris Haryadi\*<sup>1</sup>, Wihantoro<sup>1</sup>, Arundito Widikusumo<sup>2</sup> dan Etny Kurniasih<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jenderal Soedirman  
Jalan Dr. Suparno No.61 Karangwangkal Purwokerto, 53123, Jawa Tengah Indonesia

<sup>2</sup> Unit Radioterapi, RSUD Prof. Dr. Margono Soekarjo Purwokerto.

Jl. Dr Gumbreg No. 1, Purwokerto, 53146

\*e-mail: aris.haryadi@unsoed.ac.id

**Abstrak-** Makalah ini mengkaji pola kurva isodosis dari teknik tangensial radioterapi pada kasus sel kanker payudara dini yang berada di dalam payudara kiri. Dari kondisi ini, sudut penyinaran yang diambil adalah tangensial kanan dengan sudut 120° dan 300°. Berkas sinar gamma yang ditembakkan berada pada energi 1,17 dan 1,33 MeV sebagai berkas profil datar dengan ukuran SSD 80 cm dan luas medan radiasi (10 × 10) cm<sup>2</sup>. Dosis serap pada tiap titik di dalam organ dada ditentukan berdasar riwayat hidup perjalanan sinar gamma dengan metode Monte Carlo menggunakan program MCNPX. Gabungan pola isodosis dari kedua sudut penyinaran menggambarkan distribusi dosis maksimum dan minimum di tiap titik organ rongga dada. Dosis maksimum terjadi pada sel kanker dan bagian atas payudara kiri. Dari sini, dapat dikatakan penyinaran tangensial dengan sumber profil datar tidak disarankan untuk tindakan terapi kanker payudara stadium dini.

**Kata Kunci:** profil datar, tangensial, MCNPX, isodosis

*Abstract – This paper presented the isodose curve pattern form tangential radiotherapy technique on early stadium breast cancer within the left-breast. Due to such condition, it was chosen a right tangential of 120o and 300o irradiation angle, respectively. The emitted gamma ray beam were on its energy of 1.17 and 1.33 MeV as a flat-profile beam along with SSD of 80 cm and a (10 x 10) cm<sup>2</sup> radiation field area. The absorbed dose on each point within chest's organs were determined base on gamma transport history by means of Monte Carlo method using MCNPX program. Overlaying both isodose curve patterns from each tangential angle, showed some maximum and minimum absorbed dose onto each point along chest's organs. Maximum dose found onto the cancer cell and some part of top site of left-breast. Hence, it could be said that tangential irradiation with flat-profile source were not recommended for early stage breast cancer treatment.*

**Key words:** flat-profile, tangential, MCNPX, isodose.

### PENDAHULUAN

Prinsip radioterapi adalah dengan mematikan sel kanker sebanyak mungkin dengan kerusakan pada sel organ normal yang beresiko (*Organ At risk, OAR*) sekecil mungkin [1,2]. Pada radioterapi konvensional dosis radiasi dinyatakan dalam *Precent Depth Dose (PDD)* dan profil dosis (*dose profile*) dengan intensitas penyinaran yang merata. *PDD* menggambarkan distribusi dosis sepanjang sumbu pusat berkas yang memberikan sebagian informasi yang diperlukan untuk deskripsi dosis yang akurat terhadap kedalaman pasien. Profil dosis menggambarkan distribusi dosis dalam 2-dimensi terhadap bidang atau lebar medan radiasi yang ditentukan dengan data sumbu pusat *pdd* [2]

Untuk mencapai prinsip radioterapi diperlukan profil dosis ideal yang digambarkan

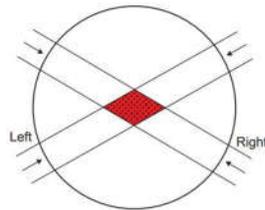
dengan dosis maksimal yang merata pada bidang medan radiasi dan nol diluar medan radiasi [3]. Dosis maksimal yang merata merupakan keluaran dari berkas profil datar (tanpa menggunakan filter baji) dengan arah penyinaran tegak lurus (90°) terhadap medan radiasi. Sedangkan pada radioterapi kanker payudara stadium dini dengan kondisi payudara utuh biasanya dilakukan penyinaran dua arah yang dikenal dengan teknik tangensial [4]. Teknik ini terdiri dari dua medan radiasi, yaitu medan tangensial medio lateral dan *latero medial*. Sudut perputaran *gantry* yang digunakan untuk kedua medan tangensial tersebut bergantung pada posisi sel kanker. Untuk sel kanker yang berada di dalam payudara kiri, maka sudut yang digunakan untuk masing-masing penyinaran adalah sudut 300° dan 120° [3]. Berdasarkan hal tersebut dalam penelitian ini telah dikaji pola kurva

isodosis dari penyinaran berkas profil datar pada kanker payudara dan organ disekitarnya dengan metode Monte Carlo menggunakan *user code* (program) MCNPX (*Monte Carlo N-Particle Extended*). Dengan diketahui pola kurva isodosis maka dapat diprediksikan dosis maksimal dan minimal yang diterima oleh kanker dan jaringan disekitar target kanker serta tindakan pencegahannya [2].

**LANDASAN TEORI**

**A. Penyinaran tangensial.**

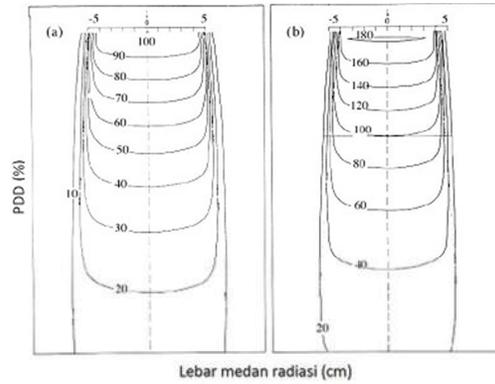
Pengurangan dosis jaringan normal yang mengelilingi sel kanker dapat dicapai dengan menggunakan kombinasi tiga medan atau lebih dari berbagai arah. Dengan menggunakan banyak medan maka rasio dosis sel kanker terhadap dosis jaringan normal meningkat [3]. Penyinaran dari berbagai arah jika dilihat dari kaki pasien dapat dilihat pada **Gambar 1.**; kiri (*Left*): penyinaran pasangan sudut 60° dan 240°, Kanan (*Right*): penyinaran pasangan sudut 300° (*medio lateral*) dan 120° (*latero medial*) [3].



**Gambar 1.** Penyinaran tangensial Left: penyinaran pasangan sudut 60° dan 240°, Right: penyinaran pasangan sudut 300° dan 120° [3].

**B. Kurva Isodosis**

Kurva isodosis adalah kurva yang menghubungkan dosis-dosis yang sama terhadap kedalaman maupun lebar medan radiasi pada phantom maupun pasien [2,3]. Kurva isodosis dapat digunakan untuk melihat distribusi dosis radiasi pada target volume kanker maupun organ beresiko yang berada di sekitarnya [5]. Kurva isodosis dari penyinaran berkas radiasi gamma Co-60 untuk dosis profil datar pada *phantom* air dengan luas medan radiasi (10×10) cm<sup>2</sup> dan SSD (*surface skin depth*) 80 cm dan SAD (*surface Axis Depth*) 100 cm dengan kedalaman *isocenter* 10 cm dapat dilihat pada **Gambar 2.**



**Gambar 2.** Kurva isodosis dari berkas radiasi gamma Co-60 untuk dosis profil datar: (a). SSD 80 cm, (b). SAD 100 cm, depth of isocenter 10 cm [2]

**METODE PENELITIAN**

Sinar gamma dari sumber Co-60 di dalam unit kepala radioterapi memancar ke segala arah secara uniform dengan arah sudut  $\theta$  dan  $\phi$  yang random. Demikian juga jenis interaksi yang terjadi antara sinar gamma dengan material komponen di dalam unit kepala radioterapi maupun jaringan phantom juga bersifat random. Interaksi yang terjadi secara random meliputi interaksi fotolistrik, hamburan Compton, produksi pasangan dan hamburan Rayleigh. Berdasarkan sifat tersebut maka peristiwa interaksi sinar gamma baik didalam kepala akselerator dan phantom organ dada model penderita kanker payudara dapat disimulasikan dengan metode Monte Carlo menggunakan program MCNPX. Adapun pada penelitian ini dilakukan melalui empat tahap: pemodelan organ dada unit dan kepala radioterapi, running program, olah data dan verifikasi.

**Tabel 1.** Volume rata-rata organ pada *phantom TRW* [6].

No.	Organ	Volume (cm <sup>3</sup> )
1	Tiroid	9,14
2	Paru-Paru	2358
3	Dinding Jantung	216
4	Jantung Bagian Dalam	311
5	Hati	957
6	Kantung Empedu	14,6
7	Pankreas	40,3
8	Limpa	122

Tahap pertama adalah membuat pemodelan phantom organ dada wanita dewasa berdasarkan

data *Phantom Taiwanese Reference Woman (TRW)*. TRW mengacu pada data geometri organ wanita dewasa orang asia dengan tinggi dan berat basan 156,2 cm dan 56,5 kg. Volume, densitas dan komposisi dasar masing-masing organ model phantom dapat dilihat pada **Tabel 1**. [6]. Kanker dimodelkan dalam bentuk bola dengan diameter 5 cm yang terletak di dalam payudara sebelah kiri.

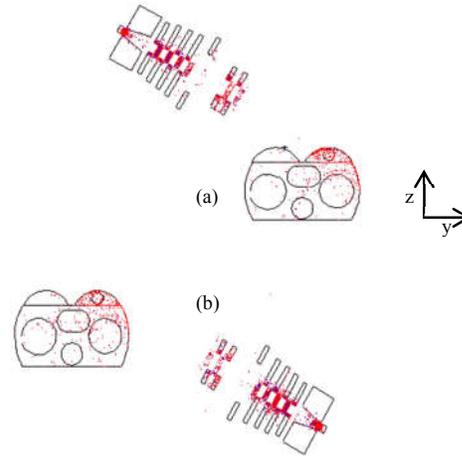
Unit kepala radioterapi Co-60 dimodelkan untuk arah peninaran  $120^\circ$  dan  $300^\circ$ . Komponen utama yang dimodelkan meliputi sumber radiasi Co-60, shielding sumber radiasi, kolimator primer, kolimator sekunder dan kompensator dengan posisi dan jarak masing masing komponen mengacu pada *GamaBeam100* [7]. Sumber dimodelkan dengan energi diskrit 1,17 dan 1,33 MeV dengan jarak sumber ke permukaan tubuh (*source-surface distance, ssd*) 100 cm dan ukuran medan radiasi  $(10 \times 10) \text{ cm}^2$ .

Pada tahap kedua, running program dilakukan dengan input user code tally *F6* untuk mengetahui energi yang diserap pada tiap *voxel* (MeV/kg) [8,9]. Spesifikasi komputer yang digunakan adalah intel core i5 RAM 2GB dengan jumlah foton  $2 \times 10^8$  foton. Berdasarkan hasil running maka data diplot dengan Program OriginPro 8. Pada tahap terakhir adalah validasi hasil simulasi perhitungan MCNPX dibandingkan dengan data eksperimen dalam hal ini *PDD* pada *phantom* air [10].

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Model Peninaran Tangensial

Hasil pemodelan unit kepala radioterapi dan model phantom organ dada wanita dewasa dengan menggunakan program MCNPX dapat dilihat pada **Gambar 3**. Gambar diambil dalam tampilan dua dimensi pada slice di pusat kanker ( $x = 0 \text{ cm}$ ) dan pada bidang  $y$  dan  $z$ . Gambar titik-titik merah merupakan probabilitas perjalanan dan interaksi radiasi gamma dengan materi. Walaupun sudah dikolimasi masih terdapat radiasi gamma terhambur kesegala arah pada jaringan normal di sekitar kanker sehingga melewati batas luas medan radiasi yang telah ditentukan atau keluar dari ukuran  $(10 \times 10) \text{ cm}^2$ .



**Gambar 3.** Hasil model peninaran tangensial dan perjalanan sinar gamma: (a) Peninaran  $120^\circ$ , dan (b) Peninaran  $300^\circ$ .

### B. Kurva Isodosis

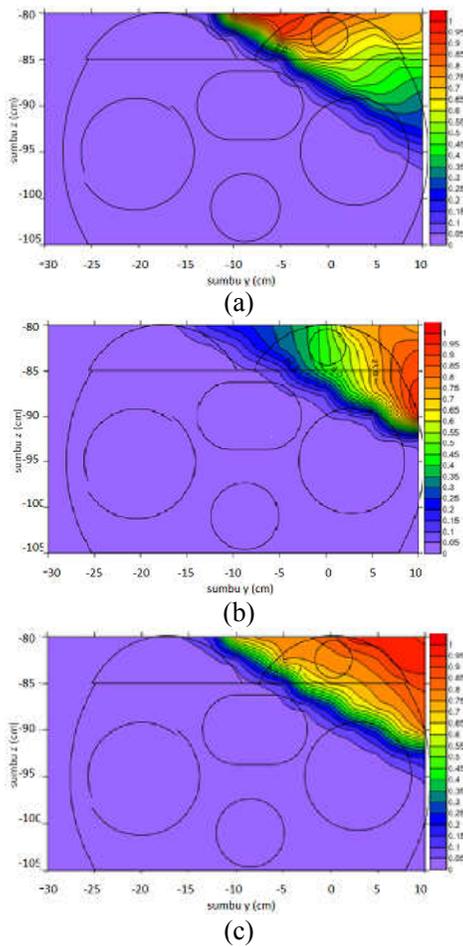
Berdasarkan simulasi perjalanan sinar gamma ketika lepas dari sumber dan interaksinya hingga jaringan phantom maka dapat ditentukan kurva isodosis seperti pada **Gambar 4**. Kurva isodosis untuk peninaran arah  $120^\circ$  menunjukkan distribusi dosis relatif tinggi terdapat pada bagian atas (**Gambar 4.a.**), sedangkan peninaran arah  $300^\circ$  (**Gambar 4.b.**) distribusi dosis relatif tinggi terdapat pada bagian bawah dan samping payudara. Kurva isodosis total untuk kedua peninaran (**Gambar 4.c.**) memperlihatkan distribusi dosis relatif tinggi pada semua bagian payudara dan pola yang tidak sesuai dengan geometri volume kanker dan geometri payudara.

Jaminan kualitas (*Quality Assurance, QA*) dalam proses perencanaan terapi radiasi sangat penting untuk meminimalkan kemungkinan paparan yang tidak semestinya [11]. Berdasarkan pola isodosis maka penyebaran dosis radiasi cukup tinggi ke organ payudara sedangkan untuk kanker stadium dini organ payudara dianggap organ yang beresiko (*OAR*) [2]. Dengan demikian, kurva isodosis dari peninaran berkas profil datar tanpa penggunaan filter wedge pada kanker payudara tidak akurat dan risiko yang harus dipertimbangkan akibat terapi radiasi.

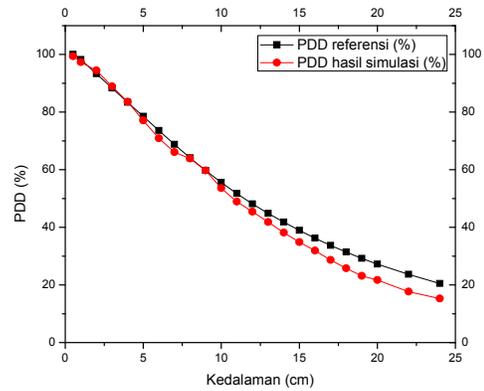
### C. Validasi

Untuk memvalidasi hasil simulasi, perhitungan MCNPX dibandingkan dengan data eksperimen. Pada penelitian ini *PDD* divalidasi dengan

pemodelan pada phantom air dengan arah penyinaran sumber radiasi tegak lurus dengan permukaan phantom air. Kedua hasil menunjukkan pola kesesuaian *PDD* antara simulasi dan hasil eksperimen seperti pada **Gambar 5**, akan tetapi pada *PDD* hasil simulasi menghasilkan faktor build-up pada kedalaman 0,45 cm sedangkan *PDD* data referensi 0,5 cm. Hal tersebut terjadi karena hamburan pada bagian atas sumber tidak diperhitungkan sehingga faktor build-up menjadi berkurang atau lebih dangkal 0,05 cm dari data referensi.



**Gambar 4.** Kurva isodosis; (a). penyinaran arah 120°, (b). penyinaran arah 300°, dan (c). penyinaran gabungan 2 arah.



**Gambar 5.** Kurva *PDD* hasil simulasi dan hasil eksperimen dengan SSD 80 cm dan luas medan radiasi (10×10) cm<sup>2</sup>.

**KESIMPULAN**

Pada penelitian ini dilakukan pemodelan unit kepala radioterapi dan phantom organ dada wanita dewasa secara tiga dimensi dengan penyinaran tangensial sudut 300° dan 120°. Dari pemodelan tersebut dapat disimulasikan perjalanan sinar gamma dan interaksinya dengan material kepala akselerator serta organ dada yang sensitif terhadap dalam proses radioterapi. Untuk perhitungan arah hambur dan jenis interaksi gamma digunakan metode Monte Carlo dengan user Code MCNPX. Untuk tujuan ini kami menggunakan Monte Carlo tiga dimensi. Dari hasil simulasi penyinaran gabungan sudut 300° dan 120° menggunakan sumber gamma berkas profil datar diperoleh bahwa pola kurva isodosis yang tidak sesuai dengan bentuk geometri payudara. Penyebaran dosis radiasi cukup tinggi ke organ payudara, sedangkan untuk kanker stadium dini organ payudara dianggap organ yang beresiko (Organ At risk, OAR). Dengan demikian, risiko seperti itu harus dipertimbangkan selama terapi radiasi dan perlu tindakan pencegahan tertentu dengan memanfaatkan blok dan filter wedge untuk membentuk pola yang sesuai [3]. Untuk memvalidasi hasil simulasi, perhitungan MCNPX dibandingkan dengan data eksperimen. Pada penelitian ini pdd menunjukkan kesesuaian antara hasil simulasi dan eksperimen. Dengan demikian, pemodelan ini dapat bermanfaat untuk memprediksi pola penyebaran radiasi yang ditampilkan dalam kurva isodosis.

**UCAPAN TERIMA KASIH**

Ucapan terima kasih kami ucapkan kepada Lembaga Penelitian UNSOED atas dana penelitian dan Unit Radioterapi RSUD Prof. Margono Soekarjo atas data, fasilitas dan kerjasamanya dalam penelitian ini.

**PUSTAKA**

- [1] R. Susworo, Radioterapi: Dasar-Dasar Radioterapi, Tata Laksana Radioterapi Penyakit Kanker, in, UI-Press, Jakarta, (2007).
- [2] E.B. Podgorsak, Radiation Oncology Physics: Hand Book for Teacher and Student, IAEA, Austria, (2005).
- [3] F.M. Khan, The Physics of Radiation Therapy, Edisi V., William and Wilkins, Maryland, USA, (2014).
- [4] Nurizati, Simulasi Perhitungan Monte Carlo Dosis Janin Pada Model Kanker Payudara Berbentuk Kotak Dengan Voton 2 MeV, Tesis, Fakultas MIPA Universitas Indonesia, Depok, (2010).
- [5] D.T. Nugraheni, V. Gunawan, C. Anam, Prediction of 2D Isodose Curve on Arbitrary Field Size in Radiation Treatment Planning System (RTPS), Jurnal Sains dan Matematika 23(1) (2015) 7–13.
- [6] S.J. Chang, S.Y. Hung, Y.L. Liu, S.H. Jiang, Construction of Taiwanese Adult Reference Phantoms for Internal Dose Evaluation, PLOS ONE 11 (9) (2016) 1–14.
- [7] Best Theratonic, Technical Specification Gamma Beam100-80, Canada, (2012).
- [8] D. B. Pelowitz, MCNPX User Manual Versi 2.6.0., LA-CP-07-1473, Los Alamos National Laboratory, New Mexico, (2008).
- [9] T. Berri s, M.Mazonakis, J. Stratakis, A. Tzedakis, A. Fasoulaki, J. Damilakis, Calculation of Organ Doses From Breast Cancer Radiotherapy: A Monte Carlo Study, Journal Of Applied Clinical Medical Physics 14 (1) ( 2013) 133–146.
- [10] S.M. Reda, E. Massoud, M.S. Hanafy, I.I. Bashter, E.A. Amin, Monte Carlo Dose Calculations for Breast Radiotherapy Using  $^{60}\text{Co}$  Gamma Rays, Journal of Nuclear and Radiation Physics 1 (1) (2006) 61- 72.
- [11] International Atomic Energy Authority (IAEA), Commissioning and Quality Assurance of Computerized Planning Systems for Radiation Treatment of Cancer, IAEA Technical report series (2004) 430.