



## DAFTAR ISI

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Halaman Judul</b>  | <b>ii</b>   |
| <b>Halaman Pengesahan</b>                                     | <b>iii</b>  |
| <b>Halaman Pernyataan</b>                                     | <b>iv</b>   |
| <b>Halaman Persembahan</b>                                    | <b>v</b>    |
| <b>Halaman Motto</b>  | <b>vi</b>   |
| <b>PRAKATA</b>  | <b>vii</b>  |
| <b>DAFTAR ISI</b>   | <b>ix</b>   |
| <b>DAFTAR TABEL</b>   | <b>xi</b>   |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b>  | <b>xii</b>  |
| <b>DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN</b>                           | <b>xv</b>   |
| <b>INTISARI</b>   | <b>xvi</b>  |
| <b>ABSTRACT</b>   | <b>xvii</b> |
| <b>I PENDAHULUAN</b>  | <b>1</b>    |
| 1.1 Latar Belakang Masalah . . . . .                          | 1           |
| 1.2 Perumusan Masalah . . . . .                               | 4           |
| 1.3 Batasan Masalah . . . . .                                 | 5           |
| 1.4 Tujuan Penelitian . . . . .                               | 5           |
| 1.5 Manfaat Penelitian . . . . .                              | 5           |
| 1.6 Tinjauan Pustaka . . . . .                                | 6           |
| 1.6.1 Teka-teki Neutrino Matahari . . . . .                   | 6           |
| 1.6.2 Formulasi Osilasi Neutrino Standar . . . . .            | 7           |
| 1.6.3 Perkembangan Terkini Osilasi Neutrino Standar . . . . . | 9           |
| 1.6.4 Anomali Osilasi Neutrino . . . . .                      | 10          |
| 1.6.5 Formulasi Osilasi Neutrino Ekstensi . . . . .           | 11          |



|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 1.6.6      | Kerangka dan Skema Osilasi Neutrino Ekstensi . . . . .                                   | 12        |
| 1.7        | Metode Penelitian . . . . .  | 14        |
| 1.8        | Sistematika Penulisan . . . . .  | 14        |
| <b>II</b>  | <b>NEUTRINO MASIF</b>  | <b>17</b> |
| 2.1        | Massa Dirac . . . . .  | 17        |
| 2.2        | Massa Majorana . . . . .   | 19        |
| 2.3        | Massa Dirac dan Majorana . . . . .   | 23        |
| 2.3.1      | Suku Massa Neutrino dalam Kasus Sederhana: Neutrino Satu<br>Generasi Dua Medan . . . . . | 25        |
| 2.4        | Mekanisme Seesaw untuk Pembangkitan Massa Neutrino . . . . .                             | 26        |
| 2.5        | Osilasi Neutrino . . . . .   | 29        |
| 2.5.1      | Efek Mikheev-Smirnov-Wolfenstein . . . . .   | 34        |
| <b>III</b> | <b>NEUTRINO STERIL</b>   | <b>37</b> |
| 3.1        | Motivasi . . . . .   | 37        |
| 3.2        | Fenomena Neutrino Steril . . . . .   | 38        |
| 3.2.1      | Eksperimen LSND dan KARMEN . . . . .   | 38        |
| 3.2.2      | Eksperimen MiniBooNE . . . . .   | 40        |
| 3.2.3      | Anomali Gallium . . . . .  | 42        |
| 3.2.4      | Anomali Reaktor Antineutrino . . . . .   | 45        |
| 3.3        | Kerangka dan Skema Osilasi Neutrino Ekstensi . . . . .                                   | 47        |
| 3.3.1      | Penambahan 1 Neutrino Steril . . . . .   | 48        |
| 3.3.2      | Penambahan 2 Neutrino Steril . . . . .   | 51        |
| 3.3.3      | Penambahan 3 Neutrino Steril . . . . .   | 53        |
| <b>IV</b>  | <b>MODEL CERMIN TERMODIFIKASI (MCT)</b>  | <b>55</b> |
| 4.1        | Deskripsi Model Cermin Termodifikasi . . . . .   | 55        |
| 4.2        | Pembangkitan Massa Boson Tera . . . . .  | 56        |
| 4.3        | Operator Muatan . . . . .  | 60        |
| 4.4        | Sektor Massa Neutrino . . . . .  | 61        |
| <b>V</b>   | <b>NEUTRINO STERIL DALAM MODEL CERMIN TERMODIFIKASI<br/>(MCT)</b>                        | <b>63</b> |
| 5.1        | Identifikasi Sektor Neutrino MCT . . . . .   | 63        |
| 5.2        | Osilasi Neutrino SBL Menurut MCT . . . . .   | 65        |



|  |   |            |
|--|---|------------|
| 5.3  | Paramaterisasi Numerik Parameter Osilasi Neutrino MCT . . . . . | 73         |
| 5.4  | Osilasi Neutrino LSND dan KARMEN Menurut MCT . . . . .          | 74         |
| <b>VI PENUTUP</b>  |   | <b>79</b>  |
| 6.1  | Kesimpulan . . . . .  | 79         |
| 6.2  | Saran . . . . .   | 80         |
| <b>DAFTAR PUSTAKA</b>                                      |   | <b>81</b>  |
| <b>A Diagonalisasi Matriks Massa</b>                       |   | <b>85</b>  |
| <b>B Diagonalisasi Matriks Massa Neutrino MCT</b>          |   | <b>88</b>  |
| B.1  | Swanilai matriks massa $\mathcal{M}$ . . . . .                  | 89         |
| B.2  | Swavektor matriks massa $\mathcal{M}$ . . . . .                 | 96         |
| <b>C Parameterisasi Numerik Matriks Massa Neutrino MCT</b> |   | <b>104</b> |



## DAFTAR TABEL

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.1 | <b>Reaksi produksi neutrino pada matahari (Olive <i>et al.</i>, 2014)</b> . . . . .  | 8  |
| 1.2 | <b>Parameter osilasi 3 neutrino berdasarkan data eksperimen. Nilai (nilai dalam kurung) berhubungan dengan HN (HT). Didefinisikan <math>\Delta m^2 = m_3^2 - (m_2^2 + m_1^2)/2</math>. <math>\Delta m^2 = \Delta m_{31}^2 - \Delta m_{21}^2 &gt; 0</math>, untuk HN dan <math>\Delta m^2 = \Delta m_{32}^2 + \Delta m_{21}^2 &lt; 0</math>, untuk HT (Olive <i>et al.</i>, 2014)</b> . . . . . | 10 |
| 1.3 | <b>Parameter osilasi neutrino ekstensi (Kopp <i>et al.</i>, 2013)</b> . . . . .  | 13 |
| 2.1 | <b>Pengaruh potensial di beberapa materi perambatan neutrino (Agarwala, 2008)</b> . . . . .  | 35 |
| 3.1 | <b>Perbandingan karakteristik eksperimen LSND dan KARMEN (Abazajian <i>et al.</i>, 2012)</b> . . . . .   | 39 |
| 3.2 | <b>Energi (keV) dan tampang lintang (<math>\sigma</math>) <math>\nu_e</math> pada proses reaksi Gallium dan elektron dari yang diemisikan dalam peluruhan <math>^{51}\text{Cr}</math> dan <math>^{37}\text{Ar}</math></b> . . . . .  | 43 |
| 3.3 | <b>Indeks eksperimen <math>k</math>, tipe sumber dan rasio <math>R_B^k</math> dan <math>R_H^k</math> yang terukur dan diprediksi dari produksi <math>^{71}\text{Ga}</math> pada eksperimen sumber radioaktif di GALLEX dan SAGE (Abazajian <i>et al.</i>, 2012)</b> . . . . .  | 44 |
| 4.1 | <b>Medan fermion dalam MCT beserta wakil dimensi dan bilangan kuantum (sektor cermin dilambangkan oleh huruf kapital) menurut grup tera <math>SU(3)_1 \otimes SU(3)_2 \otimes SU(2)_L \otimes SU(2)_R \otimes U(1)_Y \otimes U(1)_X</math> (Satriawan, 2013)</b> . . . . .   | 56 |
| 4.2 | <b>Medan Higgs dalam MCT beserta wakil dimensi dan bilangan kuantum (sektor cermin dilambangkan oleh huruf kapital) menurut grup tera <math>SU(3)_1 \otimes SU(3)_2 \otimes SU(2)_L \otimes SU(2)_R \otimes U(1)_Y \otimes U(1)_X</math> (Satriawan, 2013)</b> . . . . .   | 57 |



## DAFTAR GAMBAR

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.1 | <b>Spektrum neutrino matahari. Spektrum kontinu dalam satuan <math>\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{MeV}^{-1}</math>, spektrum garis dalam satuan <math>\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}</math> (Olive <i>et al.</i>, 2014)</b> . . . . .   | 7  |
| 1.2 | <b>Skema umum osilasi neutrino (Giunti, 2013)</b> . . . . .  | 13 |
| 1.3 | <b>Bagan alir penelitian</b> . . . . .   | 15 |
| 2.1 | <b>Rotasi campuran neutrino (Bettini, 2014)</b> . . . . .  | 33 |
| 2.2 | <b>Hamburan koheren dari <math>\nu_e</math>, <math>\nu_\mu</math> dan <math>\nu_\tau</math> pada materi (Fukugita dan Yanagida, 2003)</b> . . . . .  | 34 |
| 3.1 | <b>Spektrum energi neutrino dari peluruhan (DAR) <math>\pi^+</math> dan <math>\mu^+</math> (Abazajian <i>et al.</i>, 2012)</b> . . . . .   | 40 |
| 3.2 | <b>Plot parameter osilasi neutrino <math>\sin^2 2\theta</math> vs. <math>\Delta m^2</math> eksperimen LSND dan KARMEN. Untuk seluruh data (kiri), kombinasi dan pencocokan data (kanan) (Abazajian <i>et al.</i>, 2012)</b> . . . . .  | 41 |
| 3.3 | <b>Plot pencocokan data parameter osilasi <math>\sin^2 2\theta</math> vs. <math>\Delta m^2</math> eksperimen MiniBooNE (pada <math>E_e &gt; 200</math> MeV), LSND dan KARMEN. Untuk neutrino, <math>\nu_\mu \rightarrow \nu_e</math> (kiri) dan antineutrino, <math>\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e</math> (kanan) (Aguilar-Arevalo <i>et al.</i>, 2012)</b> . . . . . | 42 |
| 3.4 | <b>Plot pencocokan data parameter osilasi <math>\sin^2 2\theta</math> vs. <math>\Delta m^2</math> eksperimen MiniBooNE dikombinasikan dengan eksperimen LSND dan KARMEN (Aguilar-Arevalo <i>et al.</i>, 2012)</b> . . . . .  | 43 |
| 3.5 | <b>Level nuklir pada Gallium menurut persamaan (3.3) (Abazajian <i>et al.</i>, 2012)</b> . . . . .   | 45 |
| 3.6 | <b>Plot (daerah yang diizinkan) parameter osilasi <math>\sin^2 2\theta</math> vs. <math>\Delta m^2</math> menurut kombinasi data eksperimen sumber radioaktif <math>^{51}\text{Cr}</math> (GALLEX) dan sumber radioaktif <math>^{51}\text{Cr}</math> dan <math>^{37}\text{Ar}</math> (SAGE) (Abazajian <i>et al.</i>, 2012)</b> . . . . .                                    | 46 |
| 3.7 | <b>Plot (daerah yang diizinkan) parameter osilasi <math>\sin^2 2\theta</math> vs. <math>\Delta m^2</math> menurut kombinasi data-data eksperimen osilasi neutrino reaktor (Abazajian <i>et al.</i>, 2012)</b> . . . . .  | 47 |



|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.8  | <b>Kerangka dan skema osilasi neutrino dengan penambahan satu neutrino steril. Skenario hierarki normal, 3 + 1 (kiri) dan skenario hierarki invers, 1 + 3 (kanan). Beda massa kuadrat adalah <math> \Delta m_{21}^2  \ll  \Delta m_{31}^2  \ll  \Delta m_{41}^2 </math> (Giunti dan Laveder, 2011) . . . . .</b>   | 49 |
| 3.9  | <b>Plot (daerah yang diizinkan) parameter osilasi <math>\sin^2 2\theta_{ee}</math> vs. <math>\Delta m_{41}^2</math> pada eksperimen Gallium, reaktor dan <math>\nu_e - ^{12}\text{C}</math> (Giunti dan Laveder, 2011) . . . . .</b>   | 50 |
| 3.10 | <b>Kerangka dan skema osilasi neutrino dengan penambahan dua neutrino steril. Skenario hierarki normal, 3+2 (kiri), skenario hierarki terbalik, 2+3 (tengah) dan skenario hierarki campuran, 1+3+1 (kanan). Beda massa kuadrat adalah <math> \Delta m_{21}^2  \ll  \Delta m_{31}^2  \ll  \Delta m_{41}^2  &lt;  \Delta m_{51}^2 </math> (Giunti dan Laveder, 2011) . . . . .</b>   | 51 |
| 3.11 | <b>Plot nilai probabilitas <math>P</math> vs. nilai <math>L/E</math> menurut skema osilasi penambahan 2 neutrino steril pada skema (2+3)/(3+2) (garis bersambung) dan skema (1+3+1) (garis putus-putus). Diasumsikan fase pelanggaran <math>CP</math>, <math>\delta = 0</math> (atas) dan <math>CP</math>, <math>\delta = \frac{\pi}{2}</math> (bawah) (Barry, 2013) . . . . .</b> | 52 |
| 3.12 | <b>Plot pencocokan nilai parameter osilasi <math>\Delta m_{41}^2</math> vs. <math>\Delta m_{51}^2</math> yang diizinkan menurut skema osilasi (3+2) (atas kiri) dan skema (1+3+1) (bawah kanan) (Abazajian <i>et al.</i>, 2012) . . . . .</b>  | 53 |
| 3.13 | <b>Plot nilai <math>\Delta m_{51}^2</math> vs. <math>\Delta m_{41}^2</math> dan <math>\Delta m_{61}^2</math> vs. <math>\Delta m_{41}^2</math> menurut pencocokan data osilasi neutrino skema 3+3 (Conrad <i>et al.</i>, 2012) . . . . .</b>  | 54 |
| 5.1  | <b>Plot <math>\sin^2 2\theta</math> vs. rasio <math>(L_\nu/E_\nu)</math> pada osilasi <math>\nu_{\mu L} \rightarrow \nu_{eL}</math> menurut data LSND dan KARMEN (kurva <b>biru</b>) dan prediksi MCT (kurva <b>merah</b>) pada rentang <math>0,15 &lt; L_\nu/E_\nu &lt; 1,5</math> m/MeV . . . . .</b>  | 78 |
| 5.2  | <b>Plot <math>\sin^2 2\theta</math> vs. rasio <math>(L_\nu/E_\nu)</math> pada osilasi <math>\nu_{\mu L} \rightarrow \nu_{eL}</math> menurut data LSND dan KARMEN (kurva <b>biru</b>) dan prediksi MCT (kurva <b>merah</b>) pada rentang <math>0 &lt; L_\nu/E_\nu &lt; 10,4</math> m/MeV . . . . .</b>  | 78 |



## DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

|                        |   |
|------------------------|---|
| $\alpha, \beta$        | : Indeks <i>flavor</i> neutrino, $e, \mu, \tau$   |
| CC                     | : <i>Charge Current</i>   |
| CKM                    | : <i>Cabibbo Kobayashi Maskawa</i>  |
| CP                     | : <i>Charge Parity</i>  |
| $\delta$               | : Sudut fase pelanggaran <i>CP</i>  |
| $\delta_{\alpha\beta}$ | : Delta Kronecker; $\delta_{\alpha\beta} = \begin{cases} 1, \alpha = \beta \\ 0, \alpha \neq \beta \end{cases}$ |
| $\Delta m^2$           | : Beda massa kuadrat neutrino basis massa   |
| h.c.                   | : <i>Hermitian conjugate</i> (konjugasi Hermit)   |
| $i, j, k$              | : Indeks <i>massa</i> neutrino  |
| $J_\alpha$             | : Arus muatan   |
| $\mathcal{L}$          | : Rapat lagrangian  |
| LH                     | : <i>Left handed</i> (partikel berkhiralitas putar kiri)  |
| LBL                    | : <i>Long baseline</i> (eksperimen osilasi neutrino di detektor jarak jauh)                                     |
| LSND                   | : <i>Liquid Scintillation Neutrino Detector</i>   |
| MiniBooNE              | : <i>Mini Booster Neutrino Experiment</i>   |
| $\mathbb{M}$           | : Matriks massa sektor Higgs  |
| $\mathcal{M}$          | : Matriks massa sektor lepton   |
| NC                     | : <i>Neutral Current</i>  |
| $\Phi$                 | : Sudut fase osilasi  |
| $P$                    | : Probabilitas osilasi neutrino   |
| PMNS                   | : <i>Pontecorvo Maki Nakagawa Sakata</i>  |
| RH                     | : <i>Right handed</i> (partikel berkhiralitas putar kanan)  |
| SBL                    | : <i>Short baseline</i> (eksperimen osilasi neutrino di detektor jarak pendek)                                  |
| $\sin^2 2\theta$       | : Amplitudo osilasi neutrino  |
| SM                     | : <i>Standard Model</i> (model standar fisika partikel)   |
| SNO                    | : <i>Sudbury Neutrino Observatory</i>   |
| SSM                    | : <i>Solar Standard Model</i>   |
| $\theta$               | : Sudut campuran osilasi  |
| $\mathcal{U}$          | : Matriks campuran neutrino   |
| VEV                    | : <i>Vacuum Expectation Value</i>   |
| $V_{\mathcal{H}}$      | : Potensial Higgs   |