

Review Mekanisme Pembentukan Massa Neutrino melalui Seesaw Tipe I

Qidir Maulana Binu Soesanto^{(1,a)*} dan Akmal Ferdiyan^(2,b)

⁽¹⁾Departemen Fisika, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia, 50275

⁽²⁾Jurusan Fisika, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, Indonesia, 53122

Email:^{(a)*}qidirbinu@fisika.fsm.undip.ac.id, ^(b)aferdiyan@unsoed.ac.id

Diterima (12 Oktober 2022), Direvisi (12 Desember 2022)

Abstract. *There are several extensions of the Standard Model in Particle Physics to explain how the mass of neutrinos formed. One of the simplest extensions is the Seesaw Type I mechanism. In this mechanism, right-handed neutrinos are introduced which do not take part in weak interactions, which we are often referred to as sterile ($Y = 0$). In this paper, we try to write a description of this mechanism.*

Keywords: Standard Model, Seesaw Type I, mass generating mechanism.

Abstrak. Terdapat beberapa ekstensi Model Standar dalam Fisika Partikel untuk menjelaskan pembentukan massa neutrino. Salah satu ekstensi yang paling sederhana adalah mekanisme Seesaw Tipe-I. Dalam mekanisme ini diperkenalkan neutrino *right-handed* yang tidak ambil bagian dalam interaksi lemah atau sering disebut juga dengan steril ($Y = 0$). Pada tulisan ini, kami berusaha menuliskan penjabaran mengenai mekanisme ini.

Kata kunci: Model Standar, Seesaw Tipe I, Pembentukan massa.

PENDAHULUAN

Pada Fisika partikel, Model Standar (MS) adalah istilah yang disematkan pada suatu model yang digunakan sebagai referensi sampai saat ini. Model ini diajukan oleh Glashow pada 1961 [1] dan disempurnakan oleh Weinberg [2] dan Salam [3] secara terpisah pada 1968 dan sejak penemuan partikel Higgs tahun 2012 [4, 5], model ini menjadi lebih mapan. Model ini dibangun berdasarkan grup gauge $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ dan pada energi rendah berubah menjadi $SU(3)_c \times U(1)_{em}$. Meskipun menjadi acuan, ada beberapa hal yang tidak dijelaskan dalam MS. Beberapa hal yang tidak dijelaskan diantaranya adalah tidak adanya massa neutrino, interaksi gravitasi yang tidak masuk pada model ini,

tidak adanya partikel dark matter, masalah tentang ketidaksimetrian Baryon di alam semesta, dll.

Neutrino, sebagai salah satu penyusun materi di alam semesta, dipostulatkan oleh Pauli pada 1930 [6] dan ditemukan pertama kali oleh Reines dan Cowan pada tahun 1956 [7]. Partikel ini memiliki sifat tidak memiliki muatan dan memiliki massa yang sangat kecil serta interaksi yang sangat lemah dengan materi lainnya. Meskipun neutrino ada dalam susunan MS, namun neutrino memiliki sifat yang unik dibandingkan dengan partikel lain. Sifat unik ini adalah neutrino *chiralitas*-nya hanya teramati *left-handed*, tidak seperti partikel lainnya yang memiliki left dan right-handed *chirality*. Karena ketiadaan neutrino *right-handed* di alam semesta ini, maka neutrino *right-*

handed tidak dimasukkan dalam MS. Konsekuensi dari tidak adanya neutrino dalam MS adalah tidak adanya massa neutrino yang terbentuk (Secara matematis, kita tidak akan bisa membentuk massa Dirac jika tidak memiliki neutrino *right-handed*). Meskipun dalam MS neutrino *right-handed* dianggap tidak ada, terdapat kemungkinan bahwa neutrino *right-handed* sebenarnya ada namun tidak terlihat dikarenakan interaksinya yang sangat lemah dengan partikel lainnya.

Sebelum ditemukannya neutrino generasi kedua, Bruno Pontecorvo adalah ilmuwan pertama yang mengajukan gagasan bahwa neutrino memiliki massa dan berosilasi (antara neutrino dan antineutrino) [8, 9]. Setelah generasi kedua ditemukan pada tahun 1962, Maki, Nakagawa, dan Sakata mengajukan adanya neutrino mixing pada tahun yang sama [10] dan dijabarkan lebih lanjut oleh Pontecorvo pada tahun 1967 [11]. Pontecorvo menggeneralisir ide awalnya menjadi osilasi antar dua generasi. Saat ini, neutrino diketahui memiliki tiga flavor dan mixing matriks dari neutrino dinamakan sebagai PMNS (Pontecorvo – Maki – Nagakata - Sakata) matriks. Konsekuensi dari keberadaan osilasi neutrino ini adalah massa neutrino tidak lagi sama dengan nol. Dari sekian banyak ekstensi MS untuk menjelaskan massa neutrino, mekanisme seesaw adalah salah satu yang paling populer. Mekanisme seesaw sendiri memiliki beberapa tipe yang berbeda, bergantung pada proses pembentukan massa neutrinonya. Pada artikel ini, review singkat tentang mekanisme Seesaw Tipe-I diberikan. Susunan dari artikel ini dibagi dalam dua sesi utama yaitu pembahasan singkat mengenai MS, lalu mengenai mekanisme seesaw Tipe-I itu sendiri serta paparan singkat mengenai kedudukannya dalam hubungan dengan seesaw tipe lainnya, dan yang terakhir adalah kesimpulan.

MODEL STANDAR DALAM FISIKA PARTIKEL

MS pada fisika partikel adalah teori gauge non-abelian yang menggambarkan tiga (interaksi elektromagnet, interaksi lemah, dan interaksi kuat) dari empat interaksi dasar yang ada dalam alam semesta (gravitasi tidak dilibatkan dalam teori ini). Secara matematis, model ini invarian terhadap gauge grup simetri lokal $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ dimana subscript c, L, Y menyatakan color, left-handness, dan hypercharge. Pada MS, fermion dapat dituliskan sebagai:

$$\ell_{Li} = \begin{pmatrix} \nu_{ei} \\ e_i \end{pmatrix}_L, e_{Ri}, q_R = \begin{pmatrix} u_i \\ d_i \end{pmatrix}_L, u_{Ri}, d_{Ri} \quad (1)$$

($i = 1, 2, 3$ merupakan indeks family atau generasi) dimana lepton dan quark untuk left-handed berbentuk dublet dan lepton dan quark right handed berbentuk singlet dalam grup gauge $SU(2)_L \times U(1)_Y$. Sedangkan untuk neutrino *right-handed*, MS tidak memasukkannya karena di alam ini belum pernah ditemukan *right-handed* neutrino. Pada teori gauge ini, setiap quark (hanya quark) diwakili oleh color triplet:

$$u = \begin{pmatrix} u_r \\ u_g \\ u_b \end{pmatrix}, \quad d = \begin{pmatrix} d_r \\ d_g \\ d_b \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Secara umum, Lagrangian pada MS bisa dituliskan dalam bentuk:

$$\mathcal{L}_{SM} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu)\psi + \mathcal{L}_{\text{scalar}} + \mathcal{L}_{Yuk} + \mathcal{L}_{\text{gauge}} \quad (3)$$

Suku pertama dari Lagrangian ini adalah persamaan kovarian Dirac tanpa suku massa dengan

$$D_\mu = \partial_\mu + ig \frac{\tau^i}{2} W_\mu^i + i \frac{g'}{2} Y B_\mu \quad (4)$$

adalah bentuk dari turunan kovariannya. Berikutnya, suku kedua dari Lagrangian ini adalah suku medan skalar kompleks(ϕ):

$$\mathcal{L}_{\text{scalar}} = |D_\mu \phi|^2 - V(\phi^* \phi) \quad (5)$$

dengan potensialnya yang berbentuk:

$$V(\phi^* \phi) = \mu^2 \phi^* \phi + \frac{1}{4} \lambda (\phi^* \phi)^2 \quad (6)$$

dimana λ adalah konstanta positif dan riil dan μ^2 bernilai negatif (supaya terjadi perusakan simetri secara spontan). Dari bentuk potensial inilah kita akan mendapatkan suku massa Higgs melalui mekanisme Higgs [12, 13] dan dari suku kinetik Lagrangian skalar inilah kita bisa mendapatkan gauge boson $W_\mu^\pm, Z_\mu$. Berikutnya, suku ketiga dari pers.(3), adalah Lagrangian Yukawa yang memberikan interaksi antar fermion dan boson:

$$\mathcal{L}_{\text{Yuk}} = \mathcal{L}_{\text{Yuk}}^\ell + \mathcal{L}_{\text{Yuk}}^q \quad (7)$$

dimana

$$\mathcal{L}_{\text{Yuk}}^\ell = -G_\ell [\bar{\psi}_{R\ell}(\phi^\dagger \psi_{L\ell}) + (\bar{\psi}_{L\ell}\phi)\psi_{R\ell}] \quad (8)$$

dan

$$\mathcal{L}_{\text{Yuk}}^q = -\sum_{i,j=1}^3 \left[G_{ij}^u \bar{\psi}_{Ru_i} (\tilde{\psi}^\dagger \psi_{Lj}) + G_{ij}^d \bar{\psi}_{Rd_i} (\psi^\dagger \psi_{Lj}) \right] + h.c. \quad (9)$$

dengan $\tilde{\phi} = i\sigma_2 \phi^*$. Dari Lagrangian inilah kita nanti akan mendapatkan massa dari lepton dan quark setelah perusakan simetri secara spontan (*spontaneous symmetry breaking*). Lalu untuk suku yang terakhir, yaitu Lagrangian gauge, memiliki bentuk:

$$\mathcal{L}_{\text{gauge}} = -\frac{1}{4} W_{\mu\nu} W^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu}. \quad (10)$$

Tabel 1. Daftar partikel dan muatan Model Standar dalam Fisika Partikel.

	Generasi			muatan		
	I	II	III	I_3	Y	Q
lepton	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$	$1/2$ $1/2$	$-1/2$ $-1/2$	0 1
	e_R	μ_R	τ_R	0	-1	-1
quark	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$	1	1	1
	u_R	c_R	t_R	0	$2/3$	$2/3$
	d_R	s_R	b_R	0	$-1/3$	$-1/3$

MEKANISME SEESAW TIPE I

Mekanisme Seesaw Tipe-I adalah perluasan dari SM yang memperkenalkan singlet neutrino right-handed dengan hypercharge sama dengan nol dan juga *colorless* (*sterile neutrino*). Dengan adanya tambahan neutrino *right-handed* dalam sektor lepton, maka kita memiliki:

$$\ell_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L, e_R, \nu_R. \quad (11)$$

Karena asumsi sifatnya dari neutrino right handed yang diberikan, maka kita akan sangat sangat sulit untuk dideteksinya. Meskipun demikian, neutrino right handed ini memiliki interaksi dengan lepton dan Higgs boson:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{Yuk}} &= -(G_\nu)_{ij} \ell_{Li} \tilde{\phi} \nu_{Rj} \\ &= -(G_\nu)_{ij} (\bar{\nu} \quad \bar{e})_{Li} i\sigma_2 \phi^* \nu_{Rj} \\ &= -(G_\nu)_{ij} (\bar{\nu} \quad \bar{e})_{Li} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} (v + h) \right) \nu_{Rj} \\ &= -\frac{1}{\sqrt{2}} (G_\nu)_{ij} v \bar{\nu}_{Li} \nu_{Rj} - \\ &\quad \frac{1}{\sqrt{2}} (G_\nu)_{ij} h \bar{\nu}_{Li} \nu_{Rj}. \end{aligned} \quad (12)$$

Dari bentuk ini, massa neutrino sebenarnya sudah dimunculkan tetapi ini tidak terlihat alami karena akan ada perbedaan kopling yang sangat besar antara elektron dengan neutrino. Karena inilah diperkenalkan suku massa Majorana:

$$\mathcal{L}_M = -\frac{1}{2} \bar{\nu}^c_{Ri} (M_R)_{ij} \nu_{Rj} - \frac{1}{2} \nu_{Li} (M_L)_{ij} \bar{\nu}^c_{Lj} \quad (13)$$

sehingga suku massa lengkap dari neutrino dengan grup gauge $SU(2)_L \times U(1)_Y$ memiliki bentuk:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}^\nu &= \mathcal{L}_{\text{Yuk}} + \mathcal{L}_M \\ &= -(G_\nu)_{ij} (\bar{\nu} \quad \bar{e})_{Li} i\sigma_2 \phi^* \nu_{Rj} - \\ &\quad \frac{1}{2} \bar{\nu}^c_{Ri} (M_R)_{ij} \nu_{Rj} - \frac{1}{2} \nu_{Li} (M_L)_{ij} \bar{\nu}^c_{Lj}. \end{aligned} \quad (14)$$

Sama seperti pembentukan massa elektron, setelah *elektroweak symmetry breaking*, $\mathcal{L}_{\text{Yuk}}$ menghasilkan suku massa Dirac untuk neutrino:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{Yuk}}^D &= -\bar{\nu}_{Li} (M_D)_{ij} \nu_{Rj} \\ &= -\frac{1}{2} \bar{\nu}_{Li} (M_D)_{ij} \nu_{Rj} - \frac{1}{2} \bar{\nu}_{Li} (M_D)_{ij} \nu_{Rj} \\ &= -\frac{1}{2} \bar{\nu}_{Li} (M_D)_{ij} \nu_{Rj} - \frac{1}{2} \bar{\nu}^c_{Ri} (M_D)_{ji} \nu_{Lj}^c \end{aligned} \quad (15)$$

dan Lagrangian lengkap yang menjabarkan sektor massa neutrino pada pers.(14) dapat kita tuliskan:

$$\mathcal{L}^\nu = -\frac{1}{2} \bar{\nu}_{Li} (M_D)_{ij} \nu_{Rj} - \frac{1}{2} \bar{\nu}^c_{Ri} (M_D)_{ji} \nu_{Lj}^c$$

$$-\frac{1}{2}\bar{\nu}^C_{Ri}(M_R)_{ij}\nu_{Rj}-\frac{1}{2}\bar{\nu}_{Li}(M_L)_{ij}\nu^C_{Lj} \\ = -\bar{\psi}_i\mathcal{M}_{ij}\psi_j \quad (16)$$

atau, dalam bentuk matriks:

$$\mathcal{L}^\nu = -\frac{1}{2}(\bar{\nu}_L \quad \bar{\nu}_R^C)\begin{pmatrix} M_L & M_D \\ M_D^T & M_R \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \nu_L^C \\ \nu_R \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Dari apa yang kita dapatkan ini, kita lihat bahwa hanya neutrino lah yang bisa memiliki suku massa Majorana dengan memiliki $\mathcal{L}_L$ dan $\mathcal{L}_R$. Hal ini karena neutrino adalah partikel bermuatan netral dalam MS. Dalam matriks massa di atas, suku massa Majorana sisi left handed ν_L tidak diijinkan oleh simetri dari MS karena ini tidak invarian terhadap transformasi $SU(2)_L \times U(1)_Y$. Di sisi lain, suku massa Majorana untuk ν_R diperbolehkan oleh simetri dari MS karena ν_R berbentuk singlet pada $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$. Oleh karena itu bisa kita simpulkan bahwa suku massa Dirac-Majorana dengan $M_L = 0$ diperbolehkan pada kerangka MS dengan tambahan medan chiral neutrino right-handed ν_R [14]:

$$\mathcal{L}^\nu = -\frac{1}{2}(\bar{\nu}_L \quad \bar{\nu}_R^C)\begin{pmatrix} 0 & M_D \\ M_D^T & M_R \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \nu_L^C \\ \nu_R \end{pmatrix} \\ = -\frac{1}{2}(\bar{\nu}_L \quad \bar{\nu}_R^C)\mathcal{M}_\nu\begin{pmatrix} \nu_L^C \\ \nu_R \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Karena bentuk suku massanya masih tercampur, maka kita diagonalisasi matriks $\mathcal{M}_\nu$ dengan cara:

$$\det|\mathcal{M}_\nu - m\mathbf{1}| = 0 \\ \det\begin{vmatrix} 0-m & M_D \\ M_D^T & M_R-m \end{vmatrix} = 0 \\ m^2 - mM_R - |M_D|^2 = 0 \\ (m + \frac{|M_D|^2}{M_R})(m - M_R) \approx 0 \quad (19)$$

dan kita dapatkan:

$$m_1 = -\frac{|M_D|^2}{M_R} \quad \text{dan} \quad m_2 = M_R. \quad (20)$$

Hubungan antara basis lama dan basis baru ini dalam bentuk matriks bisa kita tuliskan sebagai:

$$O\mathcal{M}_\nu O^T = \begin{pmatrix} -\frac{|M_D|^2}{M_R} & 0 \\ 0 & M_R \end{pmatrix} \quad (21)$$

dengan

$$O = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (22)$$

Berikutnya, karena M_R tidak berhubungan dengan skala SM, kita bisa memiliki nilai M_R berapapun (disini kita asumsikan $M_R \gg M_D$ dan kita punya $m_1 \ll m_2$) tapi karena m_1 memiliki nilai negatif, arti fisis dari bentuk ini tidak kita peroleh. Supaya mendapatkan arti fisis, kita gunakan biunitary transformation dengan memperkenalkan K :

$$K = \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (23)$$

sehingga kita memiliki hubungan

$$\mathcal{M}_\nu = O^T K^T \begin{pmatrix} \frac{|M_D|^2}{M_R} & 0 \\ 0 & M_R \end{pmatrix} K O \\ = U^T \begin{pmatrix} \frac{|M_D|^2}{M_R} & 0 \\ 0 & M_R \end{pmatrix} U \quad (24)$$

dengan

$$U = K O = \begin{pmatrix} i\cos\theta & -i\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}. \quad (25)$$

Dari sini kita punya:

$$\mathcal{L}^\nu = -\frac{1}{2}(\bar{\nu}_L \quad \bar{\nu}_R^C)\begin{pmatrix} 0 & M_D \\ M_D^T & M_R \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \nu_L^C \\ \nu_R \end{pmatrix} \\ = -\frac{1}{2}(\bar{\nu}_L \quad \bar{\nu}_R^C) \times \\ \begin{pmatrix} i\cos\theta & \sin\theta \\ -i\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{|M_D|^2}{M_R} & 0 \\ 0 & M_R \end{pmatrix} \times \\ \begin{pmatrix} i\cos\theta & -i\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L^C \\ \nu_R \end{pmatrix} \\ = -\frac{1}{2}(\bar{\nu}_{1L} \quad \bar{\nu}_{2L}) \begin{pmatrix} \frac{|M_D|^2}{M_R} & 0 \\ 0 & M_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_{1R} \\ \nu_{2R} \end{pmatrix} \\ = -\frac{1}{2}\frac{|M_D|^2}{M_R}\bar{\nu}_{1L}\nu_{1R} - \frac{1}{2}M_R\bar{\nu}_{2L}\nu_{2R} \quad (26)$$

dimana

$$\begin{pmatrix} \nu_{1R} \\ \nu_{2R} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i\cos\theta & -i\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L^C \\ \nu_R \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{pmatrix} \nu_{1L} \\ \nu_{2L} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i\cos\theta & -i\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L^C \\ \nu_R^C \end{pmatrix}. \quad (28)$$

Untuk neutrino dengan tiga generasi, $N = 3$, seperti pada MS, suku massa neutrino dituliskan sebagai:

$$\mathcal{L}^\nu = -Y_\nu(\bar{\nu} \quad \bar{e})_L i\sigma_2 \phi^* N_R - \frac{1}{2}\bar{N}_R^C(M_R)N_R^C \quad (29)$$

dengan N_R adalah neutrino *right-handed* yang berat dan ν adalah neutrino yang ringan. Dalam bentuk matriks:

$$\mathcal{L}^\nu = -\frac{1}{2}(\nu^T N^T) \begin{pmatrix} 0 & M_D \\ M_D^T & M_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu \\ N \end{pmatrix} \quad (30)$$

dengan $\nu = (\nu_1 \ \nu_2 \ \nu_3)^T$ dan $N = (N_1 \ N_2 \ N_3)^T$, disini M_D dan M_R adalah matriks 3×3 . Seperti sebelumnya, karena matriks massanya tidak diagonal maka kita harus mendiagonalkannya dan mendapatkan:

$$D_\nu = \begin{pmatrix} \frac{|M_D|^2}{M_R} & 0 \\ 0 & M_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_\nu & 0 \\ 0 & M_R \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} m_{\text{light}} & 0 \\ 0 & M_{\text{heavy}} \end{pmatrix} = m_n. \quad (31)$$

Massa ini terkait dengan:

Diag $m_n =$

$$(m_{\nu_1}, m_{\nu_2}, m_{\nu_3}, M_{N_1}, M_{N_2}, M_{N_3}) \quad (32)$$

Bukti bahwa neutrino memiliki massa diberikan oleh pengamatan adanya fenomena osilasi (perubahan flavor secara periodik) pada neutrino. Osilasi neutrino pertama kali dikonfirmasi oleh eksperimen Super Kamiokande pada tahun 1998 dan oleh eksperimen SNO pada tahun 2001. Osilasi neutrino terjadi karena terdapat pencampuran (mixing) di antara neutrino yang memiliki basis flavor yang berbeda. Neutrino yang diamati dalam interaksi lemah, yaitu neutrino elektron, neutrino muon dan neutrino tauon adalah neutrino dalam basis flavor. Neutrino sendiri melakukan penjalaran (propagasi) dalam basis massa [15]. Bentuk yang diberikan dalam persamaan (25) adalah untuk neutrino dalam basis massa, ketika neutrino sedang menjalar, bukan dalam basis flavor. Hubungan antara basis massa dan basis flavor diberikan oleh matriks PMNS (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata) sebagai matriks 6×6 . Atau jika kita kesampingkan *right-handed* neutrino, karena di alam ini yang terdeteksi hanyalah *left-handed* neutrino, maka bentuknya adalah matriks 3×3 :

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (33)$$

Mekanisme Seesaw dengan memperkenalkan neutrino *right-handed* seperti yang telah dijelaskan di atas dikenal dengan mekanisme seesaw tipe-I. Selain mekanisme Seesaw Tipe-I, juga terdapat mekanisme Seesaw Tipe-II (melibatkan triplet Higgs) dan Double Seesaw (melibatkan neutrino singlet kanan baru yang tidak berinteraksi dengan neutrino *left-handed* MS). Seesaw Tipe-II dan double Seesaw digunakan untuk model pembentukan massa neutrino dan proses terkait fenomenologi yang lebih rumit, sedangkan Seesaw Tipe-I adalah mekanisme Seesaw yang paling sederhana yang dapat mengakomodasi pembentukan massa neutrino yang kecil. Mekanisme Seesaw Tipe-I ini mampu digunakan untuk mengembangkan MS menjadi teori supersymmetry, tetapi tidak dapat digunakan untuk menghubungkan neutrino dalam MS dengan teori String [16]. Seesaw Tipe-I juga memiliki batasan (bound) bagi nilai terendah untuk massa neutrino *right-handed*, serta nilai batas atas untuk massa neutrino yang kecil. Mekanisme seesaw Tipe-I dan II juga bisa digunakan secara bersama dalam model tertentu seperti SO(10) [17], Left-right Symmetry [18], Two Higgs Doublet Model (2HDM) [19], dll. Pemahaman mengenai Seesaw Tipe-I sebagai seesaw yang paling sederhana akan membantu dalam memahami Seesaw Tipe-II dan Double Seesaw.

KESIMPULAN

Telah dijabarkan mekanisme Seesaw Tipe-I sebagai salah satu model untuk menjelaskan massa neutrino. Seesaw Tipe-I menggunakan pembentukan massa melalui tipe Dirac dan Majorana untuk neutrino. Seesaw Tipe-I dapat memberikan massa

neutrino yang teramati dalam eksperimen, bergantung pada nilai parameter massa neutrino Dirac M_D dan neutrino Majorana M_R . Didapati bahwa dari mekanisme ini kita mendapatkan dua massa dengan syarat $M_R \gg m_\nu$, dimana m_ν adalah massa neutrino yang teramati dalam basis massa. Mekanisme Seesaw Tipe-I dapat memberikan penjelasan pembentukan massa neutrino dalam berbagai ekstensi dari Model Standar fisika partikel.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada Reinard Primulando dan Bayu Dirgantara atas diskusinya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. L. Glashow, "Partial-symmetries of weak interactions," *Nuclear Physics*, vol. 22, no. 4, pp. 579–588, 1961.
- [2] S. Weinberg, "A Model of Leptons," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 19, pp. 1264–1266, 1967.
- [3] A. Salam, "Weak and Electromagnetic Interactions," *Conf. Proc. C*, vol. 680519, pp. 367–377, 1968.
- [4] G. Aad et al., "Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC," *Phys. Lett. B*, vol. 716, pp. 1–29, 2012.
- [5] S. Chatrchyan et al., "Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV with the CMS Experiment at the LHC," *Phys. Lett. B*, vol. 716, pp. 30–61, 2012.
- [6] W. Pauli, "Dear radioactive ladies and gentlemen," *Phys. Today*, vol. 31N9, p. 27, 1978.
- [7] C. L. Cowan, F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse, and A. D. McGuire, "Detection of the free neutrino: A Confirmation," *Science*, vol. 124, pp. 103–104, 1956.
- [8] B. Pontecorvo, "Mesonium and anti-mesonium," *Sov. Phys. JETP*, vol. 6, p. 429, 1957.
- [9] B. Pontecorvo, "Inverse beta processes and nonconservation of lepton charge," *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, vol. 34, p. 247, 1957.
- [10] Z. Maki, M. Nakagawa, and S. Sakata, "Remarks on the Unified Model of Elementary Particles," *Progress of Theoretical Physics*, vol. 28, pp. 870–880, Nov. 1962.
- [11] B. Pontecorvo, "Neutrino Experiments and the Problem of Conservation of Leptonic Charge," *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, vol. 53, pp. 1717–1725, 1967.
- [12] P. W. Higgs, "Broken symmetries, massless particles and gauge fields," *Phys. Lett.*, vol. 12, pp. 132–133, 1964.
- [13] P. W. Higgs, "Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 13, pp. 508–509, 1964.
- [14] C. Giunti and C. W. Kim, *Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics*. Oxford University Press, 2007.
- [15] M. S. Athar, S. W. Barwick, T. Brunner, J. Cao, M. Danilov, K. Inoue, T. Kajita, M. Kowalski, M. Lindner, K. R. Long, N. Palanque-Delabrouille, W. Rodejohann, H. Schellman, K. Scholberg, S.-H. Seo, N. J. Smith, W. Winter, G. P. Zeller, and R. Z. Funchal, "Status and perspectives of neutrino physics," *Progress in Particle and Nuclear Physics*, vol. 124, p. 103947, 2022.
- [16] S. F. King, "Neutrino mass models," *Reports on Progress in Physics*, vol. 67, pp. 107–157, 2003.
- [17] R. N. Mohapatra, *SO(10) Grand Unification*, pp. 151–164. *Contemporary Physics*, 1986.
- [18] J. Chakraborty, "Type I and new seesaw in left-right symmetric theories," *Physics Letters B*, vol. 690, no. 4, pp. 382–385, 2010.

- [19]D. Cogollo, R. D. Matheus, T. B. de Melo, and F. S. Queiroz, “Type I + II seesaw in a two higgs doublet model,” *Physics Letters B*, vol. 797, p. 134813, 2019.

