



Metode Fast-Forward Pada Sistem Spin Tunggal Dengan Resonansi Magnetik

Muhammad Ataurrahman Aqil¹, Iwan Setiawan¹, Eko Risdianto¹

¹Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Bengkulu, Jl. WR. Supratman Kandang Limun 38122, Bengkulu, Indonesia

* Corresponding author. E-mail : ataurrahman0306@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini merupakan penelitian untuk mempercepat dinamika elektron secara adiabatik pada sistem spin tunggal dengan resonansi magnetik. Upaya mempercepat perubahan spin pada fenomena resonansi magnetik dilakukan dengan menggunakan metode *fast forward*. Penelitian ini mengulas sistem spin tunggal, yaitu sistem spin dengan dua keadaan, yakni keadaan *spin up* dan *spin down*. Untuk dapat mempercepat dinamika elektron secara adiabatik, maka pada penelitian ini harus mencari suku regularisasi, dan mencari Hamiltonian tambahan pada sistem resonansi magnetik. Metodologi yang digunakan adalah tinjauan literatur, yaitu dengan mengumpulkan jurnal dan buku yang mempelajari tentang *fast forward* dan resonansi magnetik. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah suku regularisasi dan suku Hamiltonian tambahan berbentuk matriks orde 2 yang dapat mempersingkat dinamika sistem secara adiabatik. Suku regularisasi dan Hamiltonian tambahan ini berfungsi untuk mempertahankan keadaan dan karakteristik elektron saat melakukan spin pada sistem resonansi magnetik saat dipercepat. Dengan menambahkan Hamiltonian tambahan

INFO ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diserahkan November 2025

Diterima Juni 2025

Tersedia secara online Juni 2025

Tanggal Publikasi 29 Juni 2025

Kata Kunci:

Dinamika adiabatik; Fast Forward; Magnetic resonance imaging; Mekanika Kuantum; Resonansi Magnetik.

menjamin spin elektron dapat bergerak secara adiabatik dan dipercepat dengan tetap mempertahankan level energinya.

ABSTRACT

This research is research to accelerate electron dynamics adiabatic in a single spin system with magnetic resonance. Efforts to accelerate spin changes in magnetic resonance phenomena are carried out using the Fast Forward method. This study reviews a single spin system, which is a spin system with two states, namely the spin up and spin down states. In order to accelerate electron dynamics in an adiabatic way, this study had to look for regularization terms, and look for additional Hamiltonians in magnetic resonance systems. The methodology used is a literature review, which is by collecting journals and books that study Fast Forward and magnetic resonance. The results obtained from this study are regularization terms and additional Hamiltonian terms in the form of 2nd order matrices that can shorten the dynamics of the system in an adiabatic way. These additional regularization and Hamiltonian terms serve to maintain the state and characteristics of electrons when spinning in a magnetic resonance system when accelerated. The addition of additional Hamiltonian ensures that the electron spin can move adiabatically and accelerate while maintaining its energy level.

ARTICLE INFO

Article History:

Submitted November 2025

Accepted June 2025

First Available online June 2025

Publication Date June 30, 2025

Keyword:

Adiabatic dynamics; Fast Forward; Magnetic resonance imaging; Quantum Mechanics; Magnetic Resonance.

1. Pendahuluan

MRI (*Magnetic Resonance Imaging*) merupakan salah satu teknologi canggih yang telah dibuat manusia pada bidang kedokteran [1], alat ini mengkombinasikan teknologi komputer, gelombang radio, dan juga medan magnet yang akan menghasilkan gambar penampang tubuh manusia. *Magnetic Resonance Imaging* (MRI) adalah suatu teknik penggambaran penampang tubuh berdasarkan prinsip resonansi magnetik inti atom hidrogen [2]. Menurut Agrilian et al., 2023 [3], waktu pemindaian MRI mempunyai dampak yang signifikan terhadap kualitas gambar yang dihasilkan. Ahli yang lain menyatakan bahwa, waktu pemindaian sangat penting untuk dipertimbangkan karena periode pemindaian yang berkepanjangan dapat menyebabkan pergerakan pasien selama pemeriksaan, kemudian pada akhirnya berdampak pada kualitas gambar yang dihasilkan [4]. Oleh karena itu mempercepat waktu pemindaian dapat mengoptimalkan kualitas gambar yang dihasilkan.

Penelitian ini meninjau spin tunggal pada fenomena resonansi magnetik pada *Magnetic Resonance Imaging* (MRI). Spin Tunggal merupakan spin yang ditinjau pada satu elektron yang memiliki keadaan spin $1/2$ yakni memiliki dua keadaan, spin *up* dan spin *down*. Sistem dua keadaan (TLS) merupakan salah satu sistem dasar yang terdapat pada

fisika kuantum [5]. juga menyatakan bahwa *two-level systems* (TLS) cukup berguna dalam memahami fenomena resonansi magnetik [6].

Resonansi magnetik adalah fenomena yang ditemukan dalam sistem magnetik yang memiliki momen magnetik dan momentum sudut [7]. Sedangkan menurut Britannica (2011) [8], resonansi magnetik adalah penyerapan atau emisi radiasi elektromagnetik oleh elektron atau inti atom sebagai respons terhadap penerapan gaya magnet tertentu.

Salah satu hal yang perlu diperhatikan dalam menghasilkan proses yang memerlukan waktu yang singkat adalah berubahnya karakteristik fisik maupun isi dari suatu hal tersebut [9]. Solusi dari permasalahan tersebut adalah dengan menggunakan teorema adiabatik. Teorema adiabatik dapat mempertahankan kondisi karakteristik partikel tersebut atau dengan kata lain sistem tersebut tetap berada dalam keadaan dasarnya namun dibutuhkan waktu yang lama untuk mencapai teorema adiabatik tersebut [10]. Teorema adiabatik mampu menjamin bahwa jika sistem dimulai pada salah satu keadaan eigen sesaat, dan jika keadaan tetap tidak mengalami degenerasi, maka sistem akan mengikuti keadaan ini dengan cermat [11]. Dalam mekanika kuantum suatu proses bersifat adiabatik apabila suatu sistem tetap berada pada keadaan eigen sesaat setelah

dibawah perubahan eksternal hamiltonian [12].

Dalam penelitian ini meninjau sistem pada sudut pandang mikroskopik. Pandangan mikroskopik yang dilakukan pada spin atom hidrogen erat kaitannya dengan fisika kuantum, maka digunakanlah konsep dinamika kuantum adiabatik. Dinamika kuantum adiabatik adalah mempertahankan dinamika kuantum yang tidak mengubah ciri dari sistem tersebut [13]. Telah ditemukan suatu metode yang tepat dan sesuai, agar dihasilkan produk dalam waktu yang singkat tanpa mengubah ciri dari sistem yang di tinjau [14].

Salah satu cara untuk mempercepat keadaan kuantum adiabatik tersebut yaitu melalui metode *fast-forward* yang merupakan metode untuk mempersingkat skala waktu dalam menghasilkan suatu produk [15]. *Fast-forward* (FF) adalah memproduksi suatu peristiwa dengan mempersingkat waktu yang dibutuhkan proyeksi film cepat dilayar [16]. Hal ini sesuai dengan pernyataan Setiawan, yakni teori *fast-forward* dikembangkan lebih lanjut untuk mempercepat dinamika kuantum kuasistatik atau adiabatik dengan menemukan istilah regularisasi dan potensial penggerak [17].

Dalam skema FF yang diterapkan pada dinamika kuantum adiabatik, digunakan trik faktor penskalaan waktu yang sangat besar untuk mengimbangi laju pertumbuhan parameter adiabatik yang sangat kecil [18].

Untuk dapat mempercepat sistem resonansi magnetik melalui metode *fast forward* hal yang perlu dicari adalah, mencari suku regularisasi pada sistem resonansi magnetik, dan mencari suku Hamiltonian tambahan pada sistem resonansi magnetik.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk memeriksa teori fisika secara kuantitatif melalui studi literatur yang terkait dengan teori kuantum adiabatik dan resonansi magnetik pada sistem dua level. Metode studi literatur melibatkan penelusuran hasil tulisan dari peneliti sebelumnya. Dalam konteks ini, istilah ‘studi literatur’ sering juga disebut sebagai ‘studi pustaka’ [19]. Adapun menurut Triandini, metode studi literatur adalah penelitian yang melakukan tinjauan dengan mengidentifikasi, mengkaji, mengevaluasi, dan menafsirkan jurnal ataupun penelitian yang ada [20].

Studi literatur yang dilakukan akan menggunakan sumber yang relevan, tidak semua tulisan hasil penelitian dapat dijadikan referensi. Referensi yang digunakan adalah yang berkaitan dengan topik sistem kuantum adiabatik, *fast forward*, dan resonansi magnetik. Tulisan yang layak digunakan diantaranya yaitu buku-buku karya pengarang terpercaya, jurnal-jurnal ilmiah terakreditasi, dan hasil penelitian mahasiswa dalam beragam bentuk seperti tesis, skripsi, disertasi dan lain sebagainya.

Dalam melakukan penelitian terdapat lima langkah prosedur penelitian yang dapat dijabarkan yakni sebagai berikut:

a. Persiapan

Pada tahap ini dilakukan persiapan penelitian dengan mencari dan mengumpulkan literatur yang mendukung seperti, buku-buku, jurnal dan referensi lainnya terkait teori kuantum, persamaan Schrödinger, teorema kuantum adiabatik, metode *fast forward*, dan resonansi magnetik.

b. Pengkajian Teori

Pengkajian teori dilakukan dengan menelaah persamaan Schrodinger yang kemudian menggunakan Hamiltonian awal dan Hamiltonian regularisasi untuk mencari fungsi gelombang dari sistem resonansi magnetik. Dalam tahap ini Hamiltonian awal system resonansi magnetik digunakan untuk mencari sistem eigen. Kemudian hasil yang didapatkan digunakan untuk merumuskan fungsi gelombang dari sisitem resonansi magnetik. Akan didapatkan dua keadaan dari nilai eigen sehingga fungsi gelombang yang didapatkan juga ada dua.

c. Hasil Pengkajian Teori

Hasil dari pengkajian teori yakni berupa fungsi gelombang dari sistem resonansi magnetik yang kemudian digunakan untuk mencari suku regularisasi pengganti dan Hamiltonian tambahan. Untuk mencari suku regularisasi digunakan fungsi gelombang yang telah ditemukan sebelumnya, Lalu

dengan metode *fast forward* hanya akan meninjau pada keadaan dasar untuk mencari suku regularisasi yang kemudian akan ditambahkan pada persamaan Hamiltonian awal sehingga menghasilkan Hamiltonian tambahan.

d. Analisis dan Pembahasan

Pada tahap ini, hasil yang diperoleh berupa suku regularisasi dan Hamiltonian tambahan yang akan dibahas secara sistematis. selanjutnya hasil perhitungan analitik dibandingkan dengan program *wolfram mathematica*. *Wolfram mathematica* merupakan perangkat lunak yang kuat dan memiliki berbagai kegunaan untuk komputasi teknis. dengan menggunakan *wolfram mathematica* hasil dari penelitian akan divisualisasikan dengan grafik.

e. Kesimpulan

Hasil dari analisis dan pembahasan kemudian disimpulkan untuk menjawab rumusan masalah dalam penelitian ini.

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1. Dinamika Kuantum Dipercepat Pada Sistem Spin

Tinjaun awal dilakukan terhadap teori dinamika kuantum adiabatik (Setiawan et al., 2017). Hasil dari tinjauan Hamiltonian pada sistem spin dengan parameter waktu konstan adalah sebuah solusi persamaan Schrödinger melalui penyelesaian nilai eigen [14].

$$H_0(R) \begin{pmatrix} C_1(R) \\ C_2(R) \end{pmatrix} = E(R) \begin{pmatrix} C_1(R) \\ C_2(R) \end{pmatrix} \quad (1)$$

Adapun pada keadaan adiabatik persamaan Schrödinger tergantung waktu menurut Benggadinda [21].

$$\Psi_0(R(t)) = C(R) e^{-\frac{i}{\hbar} \int_0^t E(R(t)) dt} e^{i\xi(R(t))} \quad (2)$$

dengan,

$$R(t) = R_0 + \epsilon t \quad (3)$$

t adalah waktu, ϵ adalah parameter adiabatik dengan $\epsilon \ll 1$, dan ξ adalah fase adiabatik.

Untuk mendapatkan solusi adiabatik pada persamaan (2), Hamiltonian sistem diatur menjadi seperti berikut (Setiawan, Ekawita, et al., 2023):

$$H_0^{reg} = H_0 + \epsilon \tilde{\mathcal{H}}_n \quad (4)$$

Dimana $\tilde{\mathcal{H}}$ disebut dengan suku regularisasi yang merupakan suku tambahan dari Hamiltonian awal [16]. Adapun persamaan $\tilde{\mathcal{H}}$ adalah

$$\tilde{\mathcal{H}} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} = i\hbar \left(\frac{\partial C_1}{\partial R} \right) - i\hbar \left(\sum_{j=1}^N C_j^* \frac{\partial C_j}{\partial R} \right) \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Persamaan Schrödinger *fast forward* Hamiltonian dalam keadaan adiabatik dipercepat [17] adalah sebagai

$$i\hbar \frac{\partial \Psi_{FF}}{\partial R} = (v(t) \tilde{\mathcal{H}}_n(R(\Lambda(t))) + H_0(R(\Lambda(t)))) \Psi_{FF} \\ = H_{FF} \Psi_{FF} \quad (6)$$

Dengan H_{FF} merupakan *fast forward* Hamiltonian, Ψ_{FF} merupakan keadaan dipercepat, dan $v(t)$ merupakan fungsi

kecepatan yang berasal dari limit asimtotik. limit faktor pengali waktu waktu $\alpha \rightarrow \infty$ dan limit parameter adiabatik $\epsilon \rightarrow 0$ sehingga, $\alpha \epsilon \equiv v. \Lambda(t)$ didefinisikan sebagai berikut

$$\Lambda(t) = \bar{v} \left(t - \frac{T_{FF}}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi t}{T_{FF}} \right) \right) \quad (7)$$

3.2 Metode Fast Forward Pada Sistem Spin Tunggal Dengan Resonansi Magnetik

Hamiltonian dari resonansi magnetik dengan dapat dituliskan,

$$H_0(t) = -\gamma \boldsymbol{\sigma} (\mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1(t)) \quad (8)$$

γ merupakan rasio gyromagnetik. $\mathbf{B}_0$ adalah medan magnet statis dan $\mathbf{B}_1(t)$ adalah medan magnet yang tegak lurus terhadap $\mathbf{B}_0$, yang modulusnya konstan dan berputar terhadap $\mathbf{B}_0$. Dengan $\omega_0 = -\gamma \mathbf{B}_0$, $\omega_1 = -\gamma \mathbf{B}_1$, $\mathbf{B}_0 = \mathbf{k} B_0$, dan $\mathbf{B}_1(t) = B_1 (\mathbf{i} \cos \omega t + \mathbf{j} \sin \omega t)$ maka Hamiltonian sistem resonansi magnetik menjadi,

$$H_0(t) = \omega_0 \sigma_z + \omega_1 (\cos \omega t \sigma_x + \sin \omega t \sigma_y) \quad (9)$$

ω_0 merupakan frekuensi presisi Larmor untuk medan magnet $\mathbf{B}_0$, sedangkan ω_1 merupakan frekuensi presisi Larmor untuk medan magnet $\mathbf{B}_1$.

Dimana matriks Pauli adalah,

$$\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (10)$$

$$\sigma_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \sigma_y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix} \quad \sigma_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Substitusikan matriks Pauli pada persamaan (2), sehingga didapatkan Hamiltonian awal sebagai berikut:

$$H_0(t) = \begin{bmatrix} \omega_0 & \omega_1(\cos\omega t - i\sin\omega t) \\ \omega_1(\cos\omega t + i\sin\omega t) & -\omega_0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Dengan menggunakan teorema Euler persamaan (11) dapat dituliskan kembali sebagai berikut:

$$H_0(t) = \begin{bmatrix} \omega_0 & \omega_1 e^{-i\omega t} \\ \omega_1 e^{i\omega t} & -\omega_0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Nilai eigen dan vektor eigen dari sistem resonansi magnetik berfungsi untuk mencari fungsi gelombang dari sistem resonansi magnetik. Adapun nilai eigen dari sistem resonansi magnetik adalah,

$$E_{\pm} = \pm \sqrt{\omega_0^2 + \omega_1^2} \quad (14)$$

dan vektor eigen dari sistem resonansi magnetik adalah,

$$\Psi_0^+ = \begin{pmatrix} C_1^+ \\ C_2^+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{e^{-i\omega t} (\sqrt{\omega_0^2 + \omega_1^2} + \omega_0)}{Q^+} \\ \frac{\omega_1}{Q^+} \end{pmatrix} \quad (15)$$

Dan

$$\Psi_0^- = \begin{pmatrix} C_1^- \\ C_2^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-e^{-i\omega t} (\sqrt{\omega_0^2 + \omega_1^2} - \omega_0)}{Q^-} \\ \frac{\omega_1}{Q^-} \end{pmatrix} \quad (16)$$

dengan,

$$Q_{\pm} = \sqrt{2\omega_0^2 + 2\omega_1^2 \pm 2\omega_0 \sqrt{\omega_0^2 + \omega_1^2}} \quad (17)$$

Penelitian ini menggunakan nilai keadaan dasar (Ψ_0^-), sehingga dengan menggunakan persamaan (5) dan menganggap bahwa matriks untuk, $\tilde{\mathcal{H}}$ adalah matriks hermitian maka didapatkan $\tilde{\mathcal{H}}$ pada sistem resonansi magnetik sebagai berikut.

$$\tilde{\mathcal{H}}_{11} = e^{2i\omega R(\Lambda(t))} \left(i\hbar a \frac{-e^{-i\omega R(\Lambda(t))} (\sqrt{\omega_0^2 + \omega_1^2} - \omega_0)}{Q^-} - i\hbar b \frac{\omega_1}{Q^-} \right) \quad (18)$$

dan

$$\tilde{\mathcal{H}}_{12} = e^{2i\omega R(\Lambda(t))} \left(i\hbar a \frac{\omega_1}{Q^-} + i\hbar b \frac{-e^{-i\omega R(\Lambda(t))} (\sqrt{\omega_0^2 + \omega_1^2} - \omega_0)}{Q^-} \right) \quad (19)$$

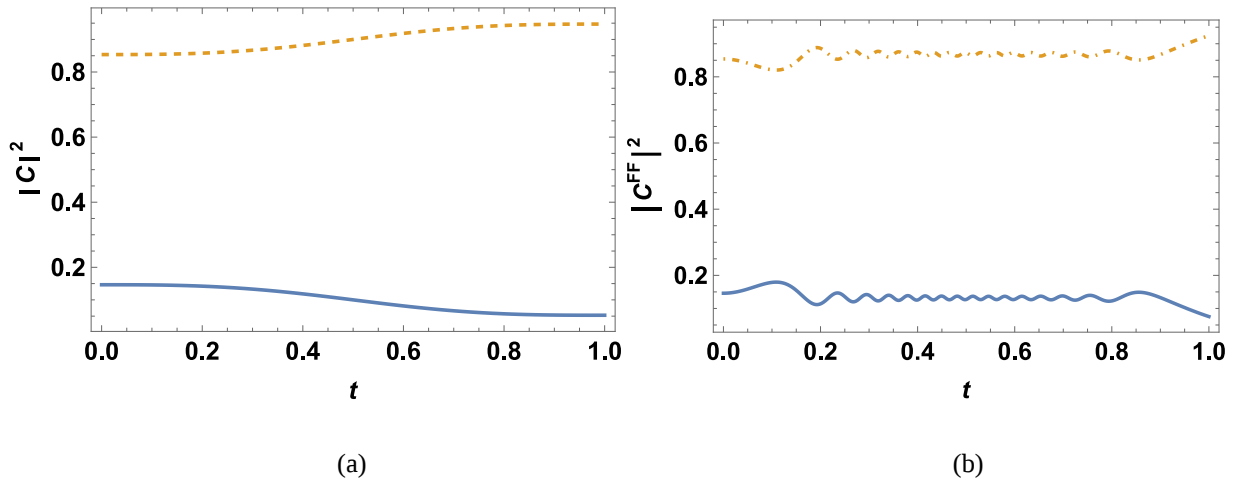
Ditinjau dari persamaan (5), $\tilde{\mathcal{H}}$ adalah sebuah matriks ($\tilde{\mathcal{H}}_{11} = -\tilde{\mathcal{H}}_{22}$) dan hermitian ($\tilde{\mathcal{H}}_{21}^* = \tilde{\mathcal{H}}_{12}$). Hal ini merupakan syarat agar energi yang dihasilkan adalah real, hal ini dikarenakan persamaan (5) merupakan sebuah persamaan aljabar linier rank = 2 dengan dua variabel yang tidak diketahui.

Suku tambahan dari sistem resonansi magnetik yang telah didapatkan disubstitusikan pada persamaan H_{FF} .

$$H_{FF} = \bar{v}(t) \tilde{\mathcal{H}}(R(\Lambda(t))) + H_0(R(\Lambda(t))), \quad (20)$$

sehingga Hamiltonian *fast forward* dapat dituliskan sebagai berikut.

$$H_{FF} = \begin{bmatrix} v(t) e^{2i\omega R(\Lambda(t))} \left(i\hbar a \frac{-e^{-i\omega R(\Lambda(t))} (\sqrt{\omega_0^2 + \omega_1^2} - \omega_0)}{Q_-} - i\hbar b \frac{\omega_1}{Q_-} \right) + \omega_0 & v(t) e^{2i\omega R(\Lambda(t))} \left(i\hbar a \frac{\omega_1}{Q_-} + i\hbar b \frac{-e^{-i\omega R(\Lambda(t))} (\sqrt{\omega_0^2 + \omega_1^2} - \omega_0)}{Q_-} \right) + \omega_1 e^{-i\omega t} \\ v(t) e^{-2i\omega R(\Lambda(t))} \left(-i\hbar a \frac{\omega_1}{Q_-} - i\hbar b \frac{-e^{i\omega R(\Lambda(t))} (\sqrt{\omega_0^2 + \omega_1^2} - \omega_0)}{Q_-} \right) + \omega_1 e^{i\omega t} & -v(t) e^{2i\omega R(\Lambda(t))} \left(i\hbar a \frac{-e^{-i\omega R(\Lambda(t))} (\sqrt{\omega_0^2 + \omega_1^2} - \omega_0)}{Q_-} + i\hbar b \frac{\omega_1}{Q_-} \right) - \omega_0 \end{bmatrix} \quad (21)$$



Gambar 2. (a) merupakan grafik ketergantungan waktu $|C_1|^2$ (garis lurus) dan $|C_2|^2$ (garis putus-putus) pada keadaan sebelum ditambah dengan Hamiltonian tambahan. (b) merupakan grafik ketergantungan waktu $|C_1^{FF}|^2$ (garis lurus) dan $|C_2^{FF}|^2$ (garis putus-putus) sesudah ditambah dengan Hamiltonian tambahan

Grafik ketergantungan waktu fungsi gelombang pada gambar 2(a) menggunakan parameter kecepatan (v) = 1; waktu akhir (T) = 1; frekuensi $\mathbf{B}_0$ (ω_0) = 2; frekuensi $\mathbf{B}_1$ (ω_1) = $\omega_0 - R$; kecepatan sudut (ω) = 100; dan parameterisasi waktu (R) = $v \left(t - \frac{T \sin(\frac{2\pi t}{T})}{2\pi} \right)$. Sedangkan pada gambar 2 (b) Setelah dilakukan beberapa kali percobaan dengan variasi parameterisasi dipilihlah parameter berikut yang menunjukkan keadaan akhir sistem yang hampir sama yakni, kecepatan (v) = 1; waktu akhir (T) = 1; frekuensi $\mathbf{B}_0$ (ω_0) = 2; frekuensi $\mathbf{B}_1$ (ω_1) = $\omega_0 - R$; kecepatan

sudut (ω) = 100; dan $R = v \left(t - \frac{T \sin(\frac{2\pi t}{T})}{2\pi} \right)$. Perbedaan parameterisasi kecepatan sudut (ω) sebesar 1 pada gambar (a) dan kecepatan sudut (ω) sebesar 100 pada gambar (b), menunjukkan bahwa dengan nilai yang berbeda keadaan akhir sistem setelah ditambah dengan Hamiltonian tambahan akan tetap pada keadaan yang sama seperti sebelum menggunakan Hamiltonian tambahan.

Dari hasil grafik tersebut keadaan awal dan akhir pada gambar 2 menunjukkan keadaan yang hampir sama. Dimana pada gambar 2 (a) $|C_1|^2$ bergerak dari titik awal

0,146 dan berada pada titik akhir di 0,053 dan $|C_2|^2$ bergerak dari titik awal 0,854 dan berada pada titik akhir di 0,947. Sedangkan pada gambar 2 (b) $|C_1^{FF}|^2$ bergerak dari titik awal 0,146 dan berada pada titik akhir di 0,075 dan $|C_2|^2$ bergerak dari titik awal 0,854 dan berada pada titik akhir di 0,925. Hal ini menunjukkan bahwa keadaan awal dan akhir sistem yang ditinjau menggunakan Hamiltonian awal dan suku regularisasi didapatkan dinamika yang relatif sama. Dari Gambar 2 (b) dapat dilihat grafik yang terbentuk lebih bergelombang dibandingkan dengan grafik 2 (a) temuan ini mengindikasikan bahwa setelah penambahan Hamiltonian, dan kecepatan sudut $\omega = 100$ keadaan akhir sistem resonansi magnetik hampir sama.

4. Simpulan

Dari penelitian ini didapatkan suku regularisasi pada sistem resonansi magnetik $\tilde{\mathcal{H}}_{11} = e^{2i\omega R(\Lambda(t))} \left(i\hbar a \frac{-e^{-i\omega R(\Lambda(t))} (\sqrt{\omega_0^2 + \omega_1^2} - \omega_0)}{Q-} - i\hbar b \frac{\omega_1}{Q-} \right)$ dan $\tilde{\mathcal{H}}_{12} = e^{2i\omega R(\Lambda(t))} \left(i\hbar a \frac{\omega_1}{Q-} + i\hbar b \frac{-e^{-i\omega R(\Lambda(t))} (\sqrt{\omega_0^2 + \omega_1^2} - \omega_0)}{Q-} \right)$, serta didapatkan suku Hamiltonian tambahan seperti pada persamaan (21). Suku regularisasi dan Hamiltonian tambahan ini berfungsi untuk mempertahankan keadaan dan karakteristik elektron saat melakukan spin pada sistem resonansi magnetik saat dipercepat. Berdasarkan gambar grafik yang dihasilkan

dari fungsi gelombang sistem resonansi magnetik, dengan menambahkan Hamiltonian tambahan dapat menjamin spin elektron dapat bergerak secara adiabatik dan dipercepat dengan tetap mempertahankan level energinya, kondisi ini dapat dimanfaatkan dalam pengembangan teknologi yang menggunakan resonansi magnetik seperti MRI.

5. Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Bengkulu yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk mengikuti kegiatan Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) penelitian 2024.

6. Referensi

1. Maulida, N. S., Susanto, E., & Murniati, E. (2019). Prosedur Pemeriksaan Magnetic Resonance Imaging (Mri) Brain Perfusi Dengan Metode Arterial Spin Labeling (Asl) Pada Pasien Tumor. *JRI (Jurnal Radiografer Indonesia)*, 2(1), 48-58.
2. Hikmah, E. M., & Juliantara, I. P. E. (2023). Peranan sequence swi (susceptibility weighted imaging) pada pemeriksaan mri brain klinis parkinson. *Jurnal riset rumpun ilmu*

- kedokteran, 2(2), 01-11.
3. Agrilian, M. P., Tarigan, A., & Sari, G. (2023). Penggunaan T2 STIR dan Fat Saturation pada Pemeriksaan MRI Lumbal Kasus Hernia Nucleus Pulposus (HNP). *Jurnal Imejng Diagnostik (JImeD)*, 9(1), 24-28.
4. Ariadi, I., Juliantara, I. P. E., & Supriyani, N. (2023). Pengaruh variasi naq terhadap signal to noise ratio (SNR) pada MRI lumbal sekuen sagittal t2-fse (speeder) dengan kasus low back pain (LBP). *Nautical: Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia*, 1(10), 1203-1211.
5. Wang, X., Liu, H. D., & Fu, L. B. (2023). Nonlinear non-Hermitian Landau–Zener–Stückelberg–Majorana interferometry. *New Journal of Physics*, 25(4), 043032.
6. Lavine, J. P. (2019). *Time-dependent quantum mechanics of two-level systems*.
7. Slichter, C. P. (2013). *Principles of magnetic resonance* (Vol. 1). Springer Science & Business Media.
8. Loria, L. (2014). *What is Magnetism?*. Britannica Educational Publishing.
9. Ainayah, N., Setiawan, I., & Hamdani, D. (2022). Methods To Accelerate Equilibrium in Overdamped Brownian Motion. *Jurnal Pendidikan Fisika Dan Keilmuan (JPFK)*, 8(2), 212–225.
10. Masuda, S., & Nakamura, K. (2009). Fast-forward of adiabatic dynamics in quantum mechanics. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466(2116), 1135–1154.
11. Berry, M. V. (2009). Transitionless quantum driving. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 42(36), 365303.
12. Hartmann, A., Mukherjee, V., Niedenzu, W., & Lechner, W. (2020). Many-body quantum heat engines with shortcuts to adiabaticity. *Physical Review Research*, 2(2), 23145.
13. Hutagalung, M., Setiawan, I., & Hamdani, D. (2023). Kajian Literatur Fase Adiabatik untuk mempercepat Dinamika Kuantum Adiabatik pada Osilator Harmonik. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 13(1), 106.
14. Setiawan, I., Gunara, B. E., Avazbaev, S., & Nakamura, K. (2019). Fast-forward approach to adiabatic quantum dynamics of

- regular spin clusters: Nature of geometry-dependent driving interactions. *Physical Review A*, 99(6), 62116.
15. Nakamura, K., Matrasulov, J., & Izumida, Y. (2020). Fast-forward approach to stochastic heat engine. *Physical Review E*, 102(1), 012129.
16. Setiawan, I., Eka Gunara, B., Masuda, S., & Nakamura, K. (2017). Fast forward of the adiabatic spin dynamics of entangled states. *Physical Review A*, 96(5), 1–11.
17. Setiawan, I., Ekawita, R., Sugihakim, R., & Gunara, B. E. (2023). Fast-forward adiabatic quantum dynamics of XY spin model on three spin system. *Physica Scripta*, 98(2).
18. Setiawan, I., Sugihakim, R., Gunara, B. E., Masuda, S., & Nakamura, K. (2023). Fast-forward generation of non-equilibrium steady states of a charged particle under the magnetic field. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2023(6), 1–12.
19. Restu, S., & MI, T. A., & Suwaji. (2021). *Metode Penelitian. Jawa Tengah: Deepublish*.
20. Triandini, E., Jayanatha, S., Indrawan, A., Putra, G. W., & Iswara, B. (2019). Metode systematic literature review untuk identifikasi platform dan metode pengembangan sistem informasi di Indonesia. *Indonesian Journal of Information Systems*, 1(2), 63-77.
21. Benggadinda, A., & Setiawan, I. (2021). Metoda Fast Forward Untuk Mempercepat Dinamika Kuantum Adiabatik Pada Spin Tunggal. *JST (Jurnal Sains Dan Teknologi)*, 10(2), 274–280.