



Memahami T1 dan T2 melalui Pulsed NMR: Sebuah Studi Literatur tentang Relaksasi Spin dalam Sistem Magnetik

Maria Tefa^{1*}, Hartoyo Yudhawardana², Aurelia Astria L. Jewaru³, Markus Simeon K. Maubuthy⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Nusa Cendana, Indonesia

Email : maria_tefa@staf.undana.ac.id^{1*}, hyudhwardana@gmail.com²,
aurelia_jewaru@staf.undana.ac.id³, markus.maubuthy@staf.undana.ac.id⁴

Alamat: Universitas Nusa Cendana, Kupang, NTT

Korespondensi penulis: maria_tefa@staf.undana.ac.id^{1*}

Abstract. *The Pulsed Nuclear Magnetic Resonance (PNMR) technique is a widely used spectroscopic approach for observing the relaxation phenomena of atomic nuclei in a magnetic field. In this technique, the spin-lattice (T1) and spin-spin (T2) relaxation times are key parameters, as they reflect the microscopic dynamics and structure of a material system. This article presents the results of a systematic literature review of fourteen primary references that discuss the fundamental concepts of NMR, PNMR techniques, the measurement of T1 and T2, and PNMR applications. Although NMR research has seen extensive development internationally, scientific literature in the Indonesian language that specifically addresses this topic remains scarce. Therefore, this paper is intended to serve as an initial systematic resource to introduce the basic principles and potential applications of PNMR in physics and materials science.*

Keywords: *Pulsed NMR, relaxation time, spin-lattice (T1), spin-spin (T2), systematic literature review*

Abstrak. Teknik Pulsed Nuclear Magnetic Resonance (PNMR) merupakan pendekatan spektroskopi yang banyak digunakan untuk mengamati fenomena relaksasi inti atom dalam medan magnet. Dalam teknik ini, waktu relaksasi spin-lattice (T1) dan spin-spin (T2) menjadi fokus utama karena keduanya merefleksikan dinamika dan susunan mikroskopik suatu sistem material. Artikel ini menyajikan hasil studi literatur sistematis terhadap empat referensi utama yang membahas konsep dasar NMR, teknik PNMR, dan pengukuran T1 dan T2, serta aplikasi PNMR. Meskipun penelitian mengenai NMR telah berkembang luas secara internasional, literatur ilmiah dalam bahasa Indonesia yang secara khusus membahas topik ini masih sangat terbatas. Oleh karena itu, tulisan ini diharapkan dapat menjadi sumber awal yang sistematis untuk memperkenalkan prinsip dasar dan potensi penerapan PNMR dalam fisika dan ilmu material.

Kata kunci: Pulsed NMR, waktu relaksasi, spin-lattice (T1), spin-spin (T2), studi literatur sistematis

1. LATAR BELAKANG

Resonansi Magnetik Inti (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) merupakan salah satu teknik spektroskopi yang sangat penting dalam analisis struktur dan dinamika molekul dalam berbagai bidang tidak hanya dalam fisika material, tetapi juga kimia, biokimia, dan biomedis. Sejak pertama kali diperkenalkan oleh Bloch dan Purcell secara terpisah pada tahun 1946, NMR telah mengalami perkembangan pesat baik dari sisi teori maupun aplikasi eksperimen (Skoog et al., 2018; Roberts, 2025).

Prinsip dasar NMR melibatkan interaksi antara momen magnet inti atom dan medan magnet eksternal, yang menghasilkan sinyal khas ketika inti menyerap energi dari gelombang radio pada frekuensi resonansi tertentu (James, 1998; Freude, 2006; Gunawidjaja, 2012; Lambert et al., 2019).

Salah satu varian penting dalam teknik ini adalah Pulsed Nuclear Magnetic Resonance (PNMR), yang menggunakan urutan pulsa radiofrekuensi pendek (biasanya 90° dan 180°) untuk memanipulasi spin inti. Teknik ini memungkinkan pengukuran parameter relaksasi inti dengan presisi tinggi, seperti waktu relaksasi spin-lattice (T1) dan spin-spin (T2) (Goldman, 2001; Mlynárik, 2017). Parameter T1 menunjukkan waktu pemulihan magnetisasi sepanjang arah medan setelah terganggu, sedangkan T2 merepresentasikan seberapa cepat spin-spin kehilangan sinkronisasi dalam bidang transversal. Kedua parameter ini memberikan informasi penting mengenai mobilitas molekul, viskositas, interaksi antar partikel, dan dinamika internal material, serta gangguan struktural pada berbagai sistem (Keeler, 2002; Yan & Zhang, 2023).

Teknik PNMR telah banyak digunakan untuk mengkaji berbagai sistem, mulai dari material padat seperti kristal dan logam transisi, polimer, jaringan biologis, hingga cairan kompleks. Dalam penelitian polimer, misalnya, waktu relaksasi dapat digunakan untuk mengidentifikasi tingkat kristalinitas bahan (Susilawati, 2015). Di sisi lain, dalam sistem biomedis, parameter T1 dan T2 digunakan secara luas dalam teknologi MRI untuk membedakan jaringan sehat dan patologis (Mlynárik, 2017).

Meskipun literatur internasional mengenai teknik PNMR dan pengukuran waktu relaksasi telah berkembang pesat, kajian yang tersedia dalam bahasa Indonesia, khususnya yang membahas secara sistematis konsep dasar dan metode penentuan T1 dan T2, masih sangat terbatas. Beberapa artikel nasional yang ada cenderung bersifat eksperimen tanpa penekanan teori mendalam atau pemetaan metodologis yang kuat (Suwandi et al., 2016; Gunawidjaja, 2012). Akibatnya, mahasiswa dan peneliti pemula di Indonesia kesulitan menemukan referensi dasar yang dapat digunakan sebagai titik awal pembelajaran.

Oleh karena itu, studi ini disusun sebagai kajian literatur sistematis yang bertujuan memberikan pemahaman konseptual dan praktis mengenai teknik PNMR dan penentuan waktu relaksasi T1 dan T2. Melalui penelusuran dan analisis terhadap referensi nasional dan internasional yang relevan, artikel ini diharapkan dapat berkontribusi sebagai sumber pembelajaran awal yang kredibel, sekaligus membuka peluang riset lanjutan di bidang spektroskopi NMR di Indonesia.

2. METODOLOGI STUDI LITERATUR

Kajian ini dilakukan dengan pendekatan SLR berbasis narasi tematik, guna menelusuri secara sistematis berbagai literatur yang menjelaskan prinsip PNMR serta peran penting parameter T1 dan T2 dalam konteks teori dan aplikasinya. Metode ini dipilih untuk memberikan landasan teoritis yang kuat dan menyeluruh dari berbagai sumber ilmiah.

Kajian ini diarahkan untuk menjawab pertanyaan berikut:

1. Apa prinsip dasar yang mendasari teknik Pulsed NMR?
2. Bagaimana karakteristik fisik dari waktu relaksasi spin-lattice (T1) dan spin-spin (T2)?
3. Sejauh mana teknik dan pendekatan eksperimental dalam pengukuran T1 dan T2 telah mengalami perkembangan?
4. Apa saja penerapan pengukuran T1 dan T2 dalam berbagai bidang?

Literatur diperoleh melalui penelusuran sistematis dari berbagai basis data ilmiah terkemuka, seperti: ScienceDirect, Wiley Online Library, Google Scholar, arXiv.org dan Jurnal nasional terindeks SINTA. Pencarian dilakukan dengan menggunakan kata kunci gabungan dalam bahasa Inggris dan Indonesia, seperti: "Pulsed Nuclear Magnetic Resonance", "spin-lattice relaxation T1", "spin-spin relaxation T2", "PNMR spectroscopy", dan "relaksasi spin inti".

Proses seleksi literatur dalam kajian ini mengikuti kriteria inklusi dan eksklusi yang ditetapkan untuk menjamin relevansi dan kualitas referensi yang dianalisis. Adapun kriteria yang digunakan dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Artikel dan buku ilmiah yang relevan dengan fokus prinsip dasar NMR dan PNMR; T1 dan T2; Metode pengukuran T1 dan T2; dan Aplikasi T1 dan T2 dalam berbagai bidang ilmu (fisika, kimia, material, biomedis)	Artikel populer, blog, atau sumber yang tidak melalui peer review (misalnya wikipedia)
Diterbitkan antara tahun 1998–2025	Tidak relevan dengan teknik PNMR atau relaksasi spin
Ditulis dalam bahasa Inggris atau Indonesia	Artikel yang hanya menyentuh NMR tanpa membahas relaksasi T1/T2
Sumber dari jurnal nasional terakreditasi atau jurnal internasional bereputasi	Studi yang tidak menyediakan landasan teoritis atau data eksperimen

Setelah dilakukan proses seleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, sebanyak lima belas sumber utama ditetapkan sebagai bahan kajian. Seluruh literatur tersebut dianalisis secara kualitatif menggunakan pendekatan naratif tematik, yang memungkinkan pengelompokan dan pemahaman mendalam terhadap isu-isu utama dalam teknik Pulsed NMR.

Literatur yang lolos kemudian dianalisis secara kualitatif dan dikelompokkan dalam lima tema utama:

1. Prinsip dasar teknik NMR dan fisika spin inti
2. Mekanisme dan prinsip kerja Pulsed NMR
3. Konsep teoritis relaksasi T1 dan T2
4. Metode dan prosedur pengukuran T1 dan T2
5. Aplikasi T1 dan T2 dalam berbagai bidang ilmu

Hasil analisis tematik ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam menyusun pembahasan sistematik pada bagian berikutnya.

3. HASIL DAN ANALISIS LITERATUR

Analisis sistematik dilakukan terhadap 14 sumber literatur utama yang membahas aspek teoritis dan eksperimental dari teknik Pulsed NMR dan pengukuran waktu relaksasi T1 serta T2. Fokus utama dari ke 14 sumber tersebut ditampilkan pada tabel 2 berikut.

Tabel 2. Sumber Literatur Utama

No	Penulis (Tahun)	Jenis Sumber	Fokus Utama
1	Freude (2006)	Bab buku / monograf	Pembelahan tingkat energi & populasi
2	Goldman (2001)	Artikel jurnal	Teori formal relaksasi T1
3	Gunawidjaja (2012)	Artikel nasional	Pengantar dasar NMR
4	James (1998)	Buku ajar	Prinsip fisika spin inti
5	Keeler (2002)	Buku ajar	Operator spin dan relaksasi T2
6	Kühne & Ihara (2025)	Artikel jurnal	PFNMR dan pengukuran T1/T2 di medan tinggi
7	Lambert et al. (2019)	Buku ajar	Prinsip dan aplikasi NMR
8	Lambert et al. (2021)	Buku ajar	Teknik lanjutan spektroskopi NMR
9	Mlynárik (2017)	Artikel jurnal	Dasar-dasar NMR
10	Roberts (2025)	Buku ajar	Aplikasi NMR dalam kimia organik
11	Skoog et al. (2018)	Buku ajar	NMR sebagai instrumen analisis
12	Susilawati (2015)	Artikel nasional	Efek radiasi pada PVC
13	Suwandi et al. (2016)	Artikel nasional	Zero-field NMR untuk FeF ₃
14	Yan & Zhang (2023)	Artikel jurnal	Pengukuran T1 dan T1ρ pada polimer

Pembahasan dibagi ke dalam lima tema sebagai berikut.

Prinsip Dasar NMR

Teknik Resonansi Magnetik Inti (NMR) memanfaatkan interaksi antara sifat kemagnetan inti atom dan medan magnet luar yang diterapkan. Inti atom dengan bilangan spin $I \neq 0$ seperti proton (^1H) dan karbon-13 (^{13}C), memiliki momen magnetik. Menurut James (1998), inti atom yang memiliki sifat spin tidak nol akan mengalami pemisahan menjadi dua tingkat energi saat berada dalam medan magnet, yaitu satu keadaan di mana arah spin sejajar dengan medan (disebut α) dan satu lagi berlawanan arah (disebut β), dengan perbedaan energi yang tergantung pada kuatnya medan magnet. Ketika ditempatkan dalam medan magnet eksternal B_0 , inti ini mengalami pembelahan tingkat energi sesuai dengan efek Zeeman, menciptakan dua keadaan energi (untuk proton: spin-up dan spin-down).

Menurut Freude (2006), pada kondisi normal, lebih banyak inti yang berada dalam tingkat energi rendah (α) dibandingkan dengan tingkat energi tinggi (β). Ketimpangan populasi ini menciptakan dasar bagi munculnya sinyal, karena inti dapat menyerap dan

memancarkan gelombang radio—sinyal inilah yang kemudian dideteksi dalam eksperimen NMR. Dalam Lambert et al. (2019), frekuensi resonansi atau frekuensi Larmor (ω_0) dimana inti menyerap gelombang radio diberikan oleh persamaan (1):

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (1)$$

di mana γ adalah rasio giromagnetik.

Setelah eksitasi, spin akan kembali ke keadaan kesetimbangan dengan memancarkan sinyal elektromagnetik yang dapat ditangkap sebagai *Free Induction Decay* (FID). Pemrosesan sinyal FID melalui *Fourier Transform* menghasilkan spektrum frekuensi yang khas, yang menggambarkan lingkungan kimia dan fisik inti (Skoog et al., 2018). Gunawidjaja (2012) menjelaskan bahwa pemahaman prinsip resonansi ini sangat penting sebagai dasar interpretasi data dan perancangan eksperimen NMR.

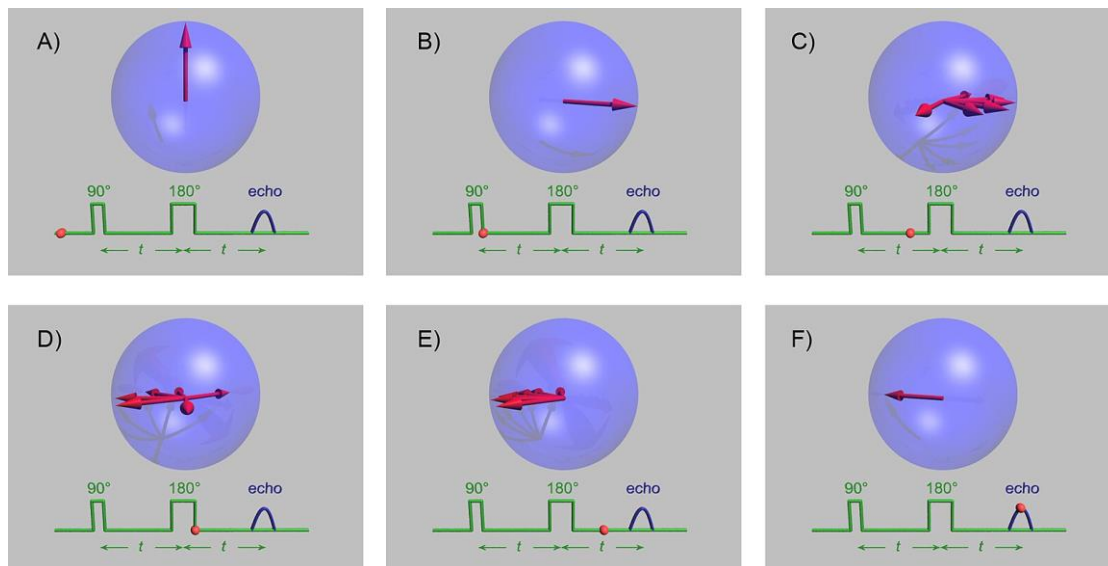
Teknik Pulsed NMR dan Spin Echo

Teknik *Pulsed Nuclear Magnetic Resonance* (PNMR) memanfaatkan pulsa radiofrekuensi berdurasi sangat singkat untuk memodulasi arah magnetisasi inti atom dalam medan magnet eksternal yang kuat (Lambert et al., 2019; Skoog et al., 2018; Mlynárik, 2017). Fenomena spin echo merujuk pada kemunculan kembali sinyal resonansi yang sempat menghilang, sebagai hasil dari rangkaian pulsa $90^\circ-t-180^\circ-t$. Urutan ini berfungsi mengatasi hilangnya keselarasan fasa akibat variasi medan magnet lokal (Skoog et al., 2018; Lambert et al., 2019; Kühne & Ihara, 2025).

Pulsa 90° memindahkan magnetisasi dari sumbu z ke bidang xy, sedangkan pulsa 180° digunakan untuk menciptakan spin echo, yang memulihkan sinyal dari spin yang mengalami dephasing akibat inhomogenitas medan magnet (Mlynárik, 2017). Sekuens $90^\circ-t-180^\circ-t$ menghasilkan echo pada waktu $2t$. Teknik ini sangat penting karena membantu kita mengukur waktu relaksasi spin-spin (T_2) secara akurat, tanpa terpengaruh oleh ketidaksempurnaan medan magnet.

Menurut Kühne & Ihara (2025), kombinasi sekuens pulsa yang tepat juga memungkinkan pengukuran parameter tambahan seperti $T_1\rho$ dan difusi molekuler, tergantung pada panjang waktu *delay* dan kecepatan rotasi sampel.

Proses Spin Echo dalam PNMR dan penjelasan urutan pulsanya dapat dilihat pada gambar 1 dan tabel 3 berturut-turut berikut.



sumber: https://en.wikipedia.org/wiki/Spin_echo (2025)

Gambar 1. Proses Spin Echo

Tabel 3. Urutan Pulsa Proses Spin Echo

Gambar	Waktu	Peristiwa Yang Terjadi
A	Awal	Spin sejajar ke z (ke atas)
B	Pulsa 90°	Spin diputar ke bidang xy (horizontal)
C	Waktu t berjalan	Spin mulai kehilangan keselarasan di bidang xy (<i>dephasing</i>) karena medan tak seragam
D	Pulsa 180°	Spin dibalik di bidang xy → posisi mereka "di-cerminkan"
E-F	Waktu t lagi	Spin bertemu kembali (<i>rephasing</i>) → sinyal echo terbentuk pada waktu $2t$

Konsep Waktu Relaksasi T1 dan T2

Saat inti atom ditempatkan dalam medan magnet kuat, mereka akan tersusun dan menghasilkan magnetisasi. Kalau kita ganggu sistem ini dengan pulsa radio (misalnya pulsa 90°), magnetisasi akan berubah arah. setelah gangguan itu, spin-spin (inti atom bermagnet) akan kembali ke keadaan semula — proses kembalinya ini disebut relaksasi, dan ada dua jenis waktu relaksasi:

1. T1 (*Spin-Lattice Relaxation Time*):

T1 merepresentasikan interval waktu yang dibutuhkan oleh sistem agar arah magnetisasi inti kembali sejajar dengan medan magnet eksternal setelah mengalami gangguan.

Nilai T1 dipengaruhi oleh interaksi antara spin dan lingkungan molekuler di sekitarnya (*lattice*), serta sangat tergantung pada dinamika gerak molekul yang terjadi pada frekuensi resonansi (Goldman, 2001; James, 1998).

2. T2 (*Spin-Spin Relaxation Time*):

T2 menggambarkan seberapa cepat spin-spin di bidang xy kehilangan keselarasan (fase) secara alami atau dapat dikatakan sebagai waktu yang dibutuhkan oleh spin selama proses dephasing secara alami tanpa pulsa 180. T2 lebih pendek dari T1 karena mencakup efek tambahan dari ketidakhomogenan medan lokal dan interaksi dipolar (Keeler, 2002; Freude, 2006).

Metode Pengukuran T1 dan T2

Pengukuran T1 umumnya dilakukan dengan teknik inversi-pemulihan 180° - t - 90° (Lambert et al., 2019; Skoog et al., 2018; Goldman, 2001; James, 1998). Nilai M_z pada berbagai waktu t direkam, menghasilkan sinyal dengan amplitudo berbeda. Ketika amplitudo sinyal ini diplot terhadap waktu inversi t , akan terbentuk kurva eksponensial, yang mengikuti persamaan:

$$M_z = M_0(1 - 2e^{-t/T_1}) \quad (2)$$

Di mana:

M_0 adalah magnetisasi pada keadaan setimbang,

t adalah waktu antara pulsa 180° dan 90° ,

T_1 adalah waktu relaksasi spin-lattice.

Pengukuran T2 dilakukan dengan teknik spin echo (Keeler, 2002; Lambert et al., 2019; Freude, 2006). Variasi jarak waktu antar pulsa menghasilkan peluruhan sinyal echo yang mengikuti persamaan:

$$M_{xy}(2t) = M_0 e^{-2t/T_2} \quad (3)$$

Di mana:

M_0 adalah amplitudo awal,

t adalah waktu antara pulsa,

T_2 adalah waktu relaksasi spin-spin.

Aplikasi Pengukuran T1 dan T2

Waktu relaksasi T_1 (spin-lattice) dan T_2 (spin-spin) dalam teknik Pulsed Nuclear Magnetic Resonance (PNMR) memberikan informasi penting mengenai dinamika molekul, struktur mikroskopik, hingga efek lingkungan terhadap inti atom bermagnet.

Dari berbagai literatur yang dianalisis, kedua parameter ini digunakan secara luas dalam konteks material polimer, bahan padat, hingga sistem biologis.

Berikut adalah beberapa contoh aplikasinya:

1. Studi Polimer dan Material Kompleks

Dalam studi yang dilakukan Yan dan Zhang (2023) terhadap polimer multiphase, nilai T_1 dan $T_{1\rho}$ digunakan untuk memetakan perbedaan segmentasi fase dan mobilitas molekul di setiap bagian material. Mereka menggunakan teknik CP-RINEPT (Cross Polarization–Refocused INEPT) yang sensitif terhadap lingkungan lokal dan interaksi antar fase keras dan lunak dalam sistem polimer. Hasilnya menunjukkan bahwa perubahan nilai T_1 mencerminkan dinamika yang lebih lambat pada fase keras dibandingkan fase lunak.

2. Dampak Perlakuan Fisik terhadap Material

Susilawati (2015) melalui eksperimen terhadap polimer PVC yang diberi perlakuan iradiasi neutron, ditemukan bahwa nilai T_1 mengalami penurunan signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa radiasi menyebabkan kerusakan struktur molekul, sehingga mengganggu efisiensi pertukaran energi antara spin dan lingkungan molekul. Dengan demikian, T_1 dapat menjadi indikator sensitivitas material terhadap stres fisik atau kimia.

3. Aplikasi dalam Material Magnetik dan Kuantum

Dalam eksperimen oleh Kühne & Ihara (2025) digunakan pulsed magnetic field hingga 100 T, pengukuran T_1 dan T_2 diterapkan untuk memahami struktur elektronik dan magnetik material kuantum, seperti LiCuVO_4 dan $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$. Teknik PFNMR (Pulsed Field NMR) memungkinkan eksplorasi sifat spin-nematik dan superstruktur magnetik pada suhu rendah. Di medan tinggi, meskipun eksperimen lebih menantang, nilai T_1 dan T_2 tetap dapat diperoleh untuk menilai korelasi spin dan distribusi energi.

4. Studi Dasar Koherensi dan Dinamika Spin

Keeler (2002) dan Freude (2006) menekankan bahwa T_2 , yang merepresentasikan kehilangan keselarasan fase antar spin, sangat sensitif terhadap fluktuasi lokal dan interaksi dipolar. Oleh karena itu, T_2 banyak digunakan untuk menganalisis homogenitas sampel, struktur jaringan padat, dan difusi spin dalam bahan diamagnetik atau paramagnetik.

5. Potensi Aplikasi Biomedis

Mlynárik (2017) dan Lambert et al. (2019) menyatakan bahwa dalam konteks pencitraan resonansi magnetik (MRI), perbedaan nilai T_1 dan T_2 antara jaringan biologis dimanfaatkan untuk menghasilkan kontras pada gambar. T_1 memberikan informasi tentang relaksasi energi, sedangkan T_2 mencerminkan heterogenitas jaringan, edema, atau aktivitas metabolik.

4. DISKUSI DAN SINTESIS TEMUAN

Kontribusi Pengetahuan dari Literatur yang Ditinjau

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa teknik Pulsed NMR (PNMR) menawarkan pendekatan eksperimental yang sangat presisi untuk mengevaluasi sifat dinamis molekul dan struktur mikroskopik suatu sistem. Waktu relaksasi T_1 dan T_2 terbukti sebagai indikator yang andal untuk menilai interaksi spin dengan lingkungan (T_1) dan interaksi antar spin (T_2), masing-masing membawa implikasi yang signifikan dalam studi material, kimia, maupun biomedis (Goldman, 2001; Lambert et al., 2019). Salah satu kekuatan PNMR terletak pada kemampuannya membedakan kondisi mikrostruktural melalui variabel waktu. Sebagai contoh, nilai T_1 yang tinggi menandakan lingkungan yang kurang padat energi atau bersifat kristalin, sementara nilai T_2 yang rendah mengindikasikan terjadinya interaksi antar spin yang tinggi atau adanya gangguan struktural.

Analisis juga menunjukkan bahwa metode pengukuran yang digunakan, seperti teknik inversi-pemulihan dan spin echo, memiliki karakteristik dan keunggulan masing-masing. Spin echo, misalnya, menjadi metode utama dalam eliminasi noise akibat ketidakhomogenan medan, yang sangat penting dalam aplikasi klinis dan pemetaan medan lokal dalam material kompleks.

Implikasi Aplikasi di Berbagai Bidang

Hasil tinjauan literatur ini menunjukkan bahwa teknik Pulsed Nuclear Magnetic Resonance (PNMR), khususnya melalui pengukuran parameter T_1 dan T_2 , memiliki nilai strategis sebagai alat karakterisasi multidisiplin yang aplikatif dalam berbagai bidang sains dan teknologi. Beberapa contoh antara lain: dalam bidang polimer, T_1 dan T_2 mampu mengungkap struktur domain keras dan lunak serta mendeteksi efek dari perlakuan eksternal seperti radiasi (Yan & Zhang, 2023). Selain itu, Susilawati (2015) menemukan bahwa perubahan nilai T_1 setelah perlakuan iradiasi neutron pada PVC dapat mencerminkan kerusakan struktur molekul, sehingga membuka potensi penggunaan T_1 sebagai indikator kerusakan fisik atau kimia pada bahan. Lebih lanjut, Kühne & Ihara (2025) memanfaatkan PNMR dalam medan magnet tinggi (hingga 100 tesla) untuk meneliti struktur spin-nematik dan superstruktur magnetik pada material kompleks berbasis Cu.

Dalam bidang biomedis, perbedaan nilai T_1 dan T_2 antara jaringan biologis menjadi dasar dalam teknik Magnetic Resonance Imaging (MRI). Kontras gambar pada MRI terbentuk dari variasi relaksasi akibat perbedaan komposisi air, struktur jaringan, dan kondisi fisiologis. Studi oleh Mlynárik (2017) dan Lambert et al. (2019) menegaskan bahwa teknik ini digunakan tidak hanya untuk pencitraan anatomi, tetapi juga untuk neuroimaging, penilaian metabolisme, dan deteksi penyakit degeneratif.

Kelemahan dan Batasan Literatur yang Ditemukan

Meskipun terdapat banyak publikasi internasional dengan data eksperimen kuat, literatur berbahasa Indonesia yang membahas konsep dasar, model teoritis, dan pengukuran T_1 serta T_2 masih sangat terbatas. Artikel nasional seperti Susilawati (2015) dan Suwandi et al. (2016) memang memberikan kontribusi eksperimental, namun belum menyentuh aspek teoretis secara mendalam. Kelemahan lainnya adalah kurangnya publikasi yang mengintegrasikan pendekatan eksperimental dengan simulasi komputasi atau model matematika lanjutan, padahal hal ini penting dalam memperluas interpretasi hasil eksperimen dan mempercepat validasi teori.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kajian literatur sistematis ini menunjukkan bahwa teknik Pulsed Nuclear Magnetic Resonance (PNMR) merupakan salah satu metode spektroskopi paling efektif dalam menganalisis sifat dinamika internal suatu sistem melalui pengukuran waktu

relaksasi spin-lattice (T1) dan spin-spin (T2). Melalui pemanfaatan sekuens pulsa yang presisi, teknik ini mampu menghasilkan data yang sensitif terhadap mobilitas molekul, struktur mikroskopik, serta kondisi lingkungan material.

Dari analisis terhadap 14 literatur utama, diperoleh bahwa: T1 mencerminkan proses pertukaran energi antara spin dan lattice, sangat berguna untuk mengamati sifat termal dan keteraturan struktur molekul. T2 mencerminkan hilangnya koherensi antar spin, penting untuk mendeteksi gangguan lokal dan heterogenitas medan magnet. Teknik spin echo dan inversi-pemulihan adalah dua pendekatan eksperimen utama untuk mengukur T1 dan T2 dengan akurat. Aplikasi T1 dan T2 sangat luas, mulai dari polimer dan material magnetik hingga diagnostik medis berbasis MRI.

Namun demikian, ditemukan pula bahwa literatur berbahasa Indonesia yang mendalami aspek teoritis dan metodologis dari teknik ini masih sangat terbatas. Oleh karena itu, artikel ini diharapkan dapat berperan sebagai sumber rujukan awal yang komprehensif untuk mahasiswa, dosen, dan peneliti pemula di bidang fisika, teknik, dan kesehatan. Dengan demikian, studi ini tidak hanya memperkuat pemahaman terhadap prinsip dan praktik PNMR, tetapi juga membuka peluang pengembangan riset dan pendidikan spektroskopi NMR di Indonesia.

DAFTAR REFERENSI

- Freude, D. (2006). Nuclear magnetic resonance. In *Spectroscopy* (Chapter 4).
- Goldman, M. (2001). Formal theory of spin-lattice relaxation. *Journal of Magnetic Resonance*, 149(1), 160–187. <https://doi.org/10.1006/jmre.2001.2233>
- Gunawidjaja, P. N. (2012). An overview of nuclear magnetic resonance. *Integral: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Dasar*, 11(1), 27–39.
- James, T. L. (1998). *Fundamentals of NMR*. University of California, San Francisco.
- Keeler, J. (2002). *Understanding NMR spectroscopy*. University of Cambridge.
- Kühne, H., & Ihara, Y. (2025). Nuclear magnetic resonance spectroscopy in pulsed magnetic fields. *arXiv preprint*, arXiv:2503.04410. <https://arxiv.org/abs/2503.04410>
- Lambert, J. B., Mazzola, E. P., & Ridge, C. D. (2019). *Nuclear magnetic resonance spectroscopy: An introduction to principles, applications, and experimental methods* (2nd ed.). Wiley.
- Lambert, J. B., Shurvell, H. F., Lightner, D. A., & Cooks, R. G. (2021). *Nuclear magnetic resonance spectroscopy*. Wiley.

- Mlynárik, V. (2017). Introduction to nuclear magnetic resonance. *Analytical Biochemistry*, 529, 4–9. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2017.03.005>
- Roberts, J. D. (2025). *Nuclear magnetic resonance: Applications to organic chemistry*. LibreTexts. <https://chem.libretexts.org>
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2018). *Principles of instrumental analysis* (7th ed.). Cengage Learning.
- Susilawati. (2015). Pengaruh radiasi neutron terhadap waktu relaksasi spin-kisi (T1) pada polimer PVC dengan spektroskopi NMR pulsa. *Jurnal Pendidikan Fisika dan Teknologi*, 1(1), 67–72.
- Suwandi, G. R. F., Setiawan, A., & Santosa, H. (2016). Zero-field nuclear magnetic resonance untuk studi antiferromagnetik material FeF_3 . *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, 12(1), 90–97.
- Yan, Z., & Zhang, R. (2023). Measurement of spin-lattice relaxation times in multiphase polymer systems. *Journal of Magnetic Resonance*, 357, Article 107168. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2023.107168>