

PENGARUH RADIASI NEUTRON TERHADAP WAKTU RELAKSASI SPIN-KISI (T_1) PADA POLIMER POLIVINIL KLORIDA (PVC) DENGAN SPEKTROSKOPI NMR PULSA

Susilawati

Program Studi Pendidikan Fisika

FKIP Universitas Mataram

Mataram, Indonesia

Email : susilawatihambali@yahoo.co.id

Abstract. A research measurement of spin-lattice relaxation time (T_1) with a pulse NMR spectrometer as well as a test of strength (tensile test and compression test) polymer material PVC (Poly Vinyl Chloride) with tools united-1 test system SFM SFM-30. The study aims to investigate the influence of the neutron fluence on the spin-lattice relaxation time (T_1) and to determine the PVC polymer material strength test. On the measurement of the spin-lattice relaxation time (T_1) is used method pulse $180^\circ\text{-}\tau\text{-}90^\circ$ and pulse method $90^\circ\text{-}\tau\text{-}90^\circ$, by means of NMR minispec P.20. Measurement of PVC polymer material strength testing using tools united-1 test system SFM SFM-30. The results showed that the spin-lattice relaxation time (T_1) PVC polymer influenced by variations in relaxation times (fluence) neutrons. From the graph of the spin-lattice relaxation time (T_1) vs. neutron fluence with the method $90^\circ\text{-}\tau\text{-}90^\circ$ obtained increases and decreases in the value of T_1 . The value of the spin-lattice relaxation time at the minimum fluence $34.56 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$, and the average value of the minimum T_1 is (271.1 ± 5.4) for the milli second pulse method $180^\circ\text{-}\tau\text{-}90^\circ$ and the average value The minimum T_1 is (263.5 ± 5.3) for the milli second pulse method $90^\circ\text{-}\tau\text{-}90^\circ$. The value of the spin-lattice relaxation time at the maximum fluence $60.98 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$, the average value of the minimum T_1 was (481.9 ± 10.1) milli second to the method also $180^\circ\text{-}\tau\text{-}90^\circ$ and the average value of T_1 The minimum was (482.5 ± 9.7) for the milli second pulse method $90^\circ\text{-}\tau\text{-}90^\circ$. Test the strength of the PVC polymer is affected by the neutron fluence. Graph PVC polymer material strength test vs. neutron fluence obtained increases and decreases in the value of the strength of the PVC polymer. Value of the minimum strength of the PVC polymer materials at fluence $34.56 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$, the average value of the minimum σ is (9.5 ± 0.1) MPa for tensile test, and the average value is the minimum σ (38.4 ± 0.1) MPa for compression test. Value of the maximum power of the PVC polymer materials at fluence $60.98 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$, the average value of the maximum σ is (43.2 ± 0.9) MPa for tensile test and the average value of the maximum σ is (55.4 ± 1.1) MPa for compression test.

Keywords: *neutron radiation, relaxation time, the polymer PVC*

PENDAHULUAN

Resonansi Magnetik Inti yang disingkat dengan RMI atau NMR (Nuclear Magnetik Resonance) dikemukakan oleh Bloch pada tahun 1946 yang merupakan salah satu alat fisika yang banyak digunakan untuk penelitian dibidang fisika. Selain penelitian dibidang fisika NMR dapat juga digunakan dalam penelitian pada bidang kimia, industri, pertanian, farmasi dan kedokteran. Alat spectrometer NMR ini pada prinsipnya bekerja berdasarkan resonansi antara momen magnet inti atom yang berputar dengan prosesi larmor dengan gelombang radio yang dikenakan padanya. Tehnik pengukuran NMR yang akan ditelaah yaitu tehnik NMR pulsa yang dikembangkan oleh Hahn [6]. Prinsip kerja NMR pulsa berdasarkan pada perubahan medan osilasi frekuensi radio secara pulsa. Perubahan medan osilasi secara pulsa akan menghasilkan perubahan amplitudo sinyal yang dapat digunakan untuk menentukan waktu relaksasi spin-kisi (T_1) yang merupakan kajian penting dalam penelitian ini.

Waktu relaksasi dapat memberikan gambaran karakteristik dari cuplikan yang dijadikan objek penelitian. Jenis cuplikan yang berbeda akan memberikan waktu relaksasi spin-kisi (T_1) yang berbeda. Hal ini disebabkan oleh perlakuan magnetisasi dari momen magnet setiap cuplikan. Waktu relaksasi spin-kisi (T_1) berhubungan dengan perpindahan tenaga antara spin dengan lingkungannya, yang didefinisikan sebagai waktu terjadinya orientasi momen magnet dari sistem acak ke pengutuban yaitu sejajar dengan medan magnet luar B_0 , sehingga mencapai keadaan setimbang dalam medan tersebut.

Tehnik pengukuran waktu relaksasi dengan NMR pulsa ini, instrumennya dikontrol oleh mikroprosesor sehingga bekerjanya alat ini dapat dikerjakan secara otomatis. Sistem deteksinya lebih cepat sehingga sangat peka untuk mempelajari sifat-sifat bahan baik berupa zat padat maupun zat cair dengan tidak merusak sampel dari bahan penelitian.

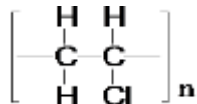
Pada penelitian ini sampel yang digunakan adalah cuplikan polimer dari bahan PVC (Poly Vinyl Chloride). Dari sampel polimer tersebut dapat dihitung waktu relaksasi spin-kisi (T1) dan uji kekuatan bahan polimer sebelum dan setelah di radiasi neutron untuk berbagai fluence neutron.

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah untuk menyelidiki pengaruh variasi waktu radiasi (fluence) neutron terhadap waktu relaksasi spin-kisi (T1) polimer PVC dan untuk mengetahui pengaruh variasi waktu radiasi (fluence) neutron terhadap kekuatan polimer (PVC).

TINJAUAN PUSTAKA

Polivinil Klorida (PVC)

Hart (1983) dalam bukunya, Organic Chemistry, menyebutkan bahwa polimer (poly = banyak, meros = bagian) adalah molekul raksasa yang biasanya memiliki bobot molekul tinggi, dibangun dari pengulangan unit-unit. Molekul sederhana yang membentuk unit-unit ulangan ini dinamakan monomer. Sedangkan reaksi pembentukan polimer dikenal dengan istilah polimerisasi. Polimer digolongkan menjadi dua macam, yaitu polimer alam (seperti pati, selulosa, dan sutra) dan polimer sintetik (seperti polimer vinil). Polivinil klorida (PVC) polimer ini merupakan polimer yang dibentuk oleh monomer kloro etilen (CH₂=CHCl).



Polimer ini memiliki sifat yang lebih kuat dibandingkan dengan etilen, tahan panas atau tidak mudah terbakar. Berdasarkan sifat inilah maka, polivinil klorida banyak dipergunakan untuk membuat pipa, selang keras, lapisan lantai, piringan hitam, dan lain-lain. PVC merupakan tipe thermoplastik, dibentuk melalui polimerisasi vinyl chloride (CH₂=CH-Cl). Ketika dibuat sifatnya mudah pecah (brittle /fragile), maka para manufaktur menambahkan suatu cairan plasticizer supaya hasilnya memiliki sifat lunak dan mudah dibentuk (moldable). PVC umumnya digunakan untuk pipa dan plumbing (pemasangan pipa saluran air) karena tahan lama, tidak berkarat, dan lebih murah dari pipa besi. Namun demikian ada batas waktu kerja plasticizer pada PVC tersebut dan bila batas waktu itu telah dilewati maka PVC kembali menjadi mudah pecah dan mudah patah [10].

Radiasi Neutron

Ada tiga jenis reaktor nuklir dilihat dari tujuan penggunaannya. Pertama adalah reaktor yang digunakan untuk tujuan penelitian yang lazim disebut reaktor penelitian (research reactor). Kedua adalah reaktor yang dirancang untuk menghasilkan listrik yang lazim disebut reaktor daya (power reactor) dan

digunakan dalam Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Ketiga adalah reaktor yang dirancang berperan ganda, yaitu sebagai penghasil listrik (berperan sebagai reaktor daya) dan produksi bahan bakar fisi (membiakkan bahan bakar nuklir) yang lazim dikenal sebagai reaktor pembiak (breederreactor) [12].

Reaktor penelitian mempunyai peran yang sangat besar dalam rangka pemanfaatan teknik nuklir di luar energi. Reaktor jenis ini hanya memanfaatkan neutron hasil reaksi fisi nuklir, sedang panas yang keluar dari reaksi nuklir itu akan dibuang. Karena memanfaatkan neutron, reaktor penelitian dirancang mempunyai fluks neutron yang cukup besar sehingga cocok sebagai sarana untuk melakukan irradiasi dengan neutron. Agar fluks neutronnya mencapai optimum, maka pada teras reaktor dikelilingi balok berillium (Be) dan beberapa baris elemen Be sebagai pemantul neutron. Selain itu, karena panasnya tidak dimanfaatkan, maka reaktor penelitian dirancang berdaya thermal rendah, yaitu berkisar dari beberapa ratus kilo Watt (kW) hingga puluhan Mega Watt (MW) [12].

Pemanfaatan teknik nuklir di luar sektor energi dapat dilakukan dengan melibatkan reaktor penelitian maupun tanpa melibatkan reaktor penelitian secara langsung. Pemanfaatan yang melibatkan reaktor penelitian umumnya adalah dengan melakukan irradiasi neutron di dalam teras reaktor. Neutron, sinar ini dipancarkan selama proses fisi nuklir dan memiliki daya penetrasi sangat besar. Neutron dapat menyebabkan ionisasi yang kuat. Proses irradiasi neutron ini banyak dimanfaatkan untuk penelitian dalam bidang kedokteran, fisika, kimia, biologi, pertanian, industri, studi lingkungan, metalurgi bahan dan sebagainya. Sedang pemanfaatan teknik nuklir yang tidak melibatkan reaktor penelitian secara langsung biasanya dilakukan dengan memanfaatkan radiasi yang dipancarkan oleh radioisotop. Dengan teknik ini, irradiasi bisa dilakukan di luar teras reaktor. Sedang radioisotopnya sendiri diproduksi dengan teknik irradiasi neutron di dalam teras reaktor. Teknik pembuatan polimer dengan bantuan radiasi ini disebut polimerisasi radiasi. Dalam bidang industri, teknologi polimerisasi radiasi dapat dipakai untuk memproduksi plastik bermutu tinggi karena sifatnya yang sangat kuat serta tahan terhadap panas. Irradiasi menyebabkan rantai molekul panjang pada polimer bergandengan pada tempat-tempat tertentu yang prosesnya dikenal sebagai pengikatan silang (crosslinking). Energi radiasi dapat merangsang terjadinya ikatan silang antar polimer sehingga terbentuk jaringan tiga dimensi yang dapat mengubah sifat polimer. Plastik PVC yang dibuat dari bahan polimer hasil irradiasi dapat mempertahankan kepadatannya pada temperatur yang jauh lebih tinggi dibandingkan plastik PVC biasa (hasil proses kimia). Dengan teknologi irradiasi ini, bahan isolasi kabel menjadi lebih kuat, lebih elastis, dan lebih tahan

terhadap minyak serta larutan kimia lainnya. Kelebihan ini dapat dicapai tanpa menyebabkan perubahan sifat kelistrikan maupun daya isolasinya. Isolasi kabel listrik umumnya dibuat dari bahan plastik polietilen atau polivinil chlorida (PVC). Kedua polimer ini merupakan jenis linier, yaitu polimer yang melunak atau leleh apabila dipanaskan [12].

Interaksi Radiasi Neutron dengan Materi

Neutron adalah partikel penyusun inti (nukleon) yang tak bermuatan dan memiliki massa yang hampir sama dengan massa proton. Oleh karena partikel tersebut tidak bermuatan maka dalam gerakannya tidak terpengaruh oleh gaya coulomb orbital maupun gaya coulomb inti, dan dapat dikatakan bahwa neutron hanya terinteraksi dengan inti atom dari bahan yang dilaluinya. Pada energi yang sama,ampang lintang neutron pada materi jauh lebih kecil dibandingkan dengan partikel-partikel bermuatan. Pada umumnyaampang lintang neutron berbanding terbalik dengan energinya, sehingga neutron mempunyai daya tembus lebih besar dibanding dengan partikel bermuatan. Interaksi neutron dengan bahan selain tergantung pada energi neutron juga tergantung pada jenis bahan. Ada beberapa mekanisme yang terjadi apabila neutron melewati suatu bahan diantaranya adalah hamburan lenting, hamburan tak lenting, reaksi tangkapan dan reaksi fisi [9].

Interaksi irradiasi neutron dengan polimer dapat menghasilkan perubahan sifat polimer sebagai akibat dari terpotongnya ikatan rantai utama (degradasi) dan terbentuknya ikatan silang antara molekul-molekul polimer yang satu dengan yang lain (cross-linking). Kedua reaksi di atas sangat dominan dalam merubah sifat polimer. Selain itu efek irradiasi neutron terhadap molekul polimer dapat merubah warna polimer. Sesuai dengan kelakuannya pada saat diirradiasi polimer dapat digolongkan menjadi dua kelompok yaitu yang secara dominan terjadi ikatan silang dan kelompok yang secara dominan terjadi pemutusan ikatan (degradasi). Umumnya kedua peristiwa tersebut terjadi secara bersama-sama. Jika di dalam polimer yang dominan pemutusan ikatan (degradasi) maka kekuatan polimer akan menurun, jika dominan ikatan silang (cross-linking) maka kekuatan polimer akan naik [9].

Terbentuknya ikatan silang dan pemutusan ikatan silang terhadap molekul polimer setelah diradiasi terlihat pada kenaikan dan penurunan nilai dari waktu relaksasi spin-spin (T1). Dari beberapa hasil eksperimen dengan jenis polimer yang berbeda kenaikan dan penurunan T1 dapat terjadi lebih dari satu kali. Pada saat nilai dari waktu relaksasi spin-kisi (T1) naik terjadi pembentukan ikatan silang akibat irradiasi neutron, sebaliknya pada saat nilai T1 turun terjadi pemutusan ikatan silang akibat irradiasi neutron. Terjadinya pemutusan ikatan silang yang

terbanyak pada saat T1 paling minimum dan terjadi pembentukan ikatan silang terbanyak pada saat nilai T1 paling maksimum [11]. Efek irradiasi neutron pada molekul polimer PVC mengakibatkan perubahan warna yang lebih menggelap, ini disebabkan terjadinya pelepasan HCl dari rantai molekul polimer PVC [3]. Degradasi polimer PVC akibat irradiasi neutron dapat memotong ikatan ganda atom karbon pada rantai molekul polimer dan menghasilkan molekul yang lebih kecil, dengan sendirinya mempengaruhi kekuatan polimer PVC [5].

Besaran yang menyatakan cacah neutron yang melalui luasan sebesar 1 cm² tiap sekon disebut fluks neutron (φ). Reaktor Kartini yang ada di BATAN Yogyakarta mempunyai fluks neutron ±4 x10¹² n/cm² dt. Apabila suatu cuplikan dikenai fluks neutron dalam selang waktu tertentu maka jumlah neutronnya menjadi fluks neutron dikalikan waktu dan satuannya menjadi n/cm² (fluence). Sejumlah neutron ini akan melakukan penembakan (aktivasi) terhadap inti-inti atom dari cuplikan

Spin Inti dan Momen Magnetik Inti

Proton dan neutron merupakan partikel penyusun inti yang disebut dengan nukleon. Setiap partikel mempunyai momentum putar orbital yang ditimbulkan oleh rotasi nukleon mengelilingi titik pusat massanya, dan spin yang berotasi disekitar sumbunya. Dengan demikian gerak momen putar orbital dan spin menghasilkan momen putar inti yang dikenal dengan spin inti. Harga spin inti tergantung pada jumlah nukleonnya, dimana harga spin inti (I) dapat bulat, tengahan, atau nol. Untuk inti gasal-gasal harga I akan bulat, untuk inti genap-genap harga I sama dengan nol, karena nukleon yang identik cenderung untuk berpasangan, hal ini disebabkan oleh momentum sudut yang ditimbulkan saling berlawanan yang dikenal dengan efek pasangan dan inti gasal-genap atau genap-gasal harga I mempunyai nilai tengahan sesuai dengan momentum sudut nukleon yang tidk berpasangan [4]. Momentum sudut inti I dapat dinyatakan :

$$|I| = [I(I + 1)]^{1/2} \hbar \tag{1}$$

Dengan I kuantum spin inti dan $\hbar = h/2\pi$ dengan h adalah tetapan Planck dengan nilai $h = 6,625 \times 10^{-34} \text{J s}$

Berdasarkan teori bahwa spin-spin inti jika berada didalam medan magnet luar Bo, harga dari proyeksi spin-spin inti tidak boleh sembarang (random), misalnya medan magnet luar Bo yang dipasang searah dengan sumbu Z positif, dan spin mempunyai harga Iz = m ħ dengan m = -I, -I + 1, ...0. ... I + 1, ... +I sehingga jumlah orientasi suatu inti dalam medan magnet sama dengan (2I + 1) dan ini disebut bilangan kuantum magnetik spin inti. Berarti bahwa meskipun harga I sudah tertentu tetapi mempunyai (2I + 1)

kemungkinan arah orientasi [8]. Untuk momen dipol magnet inti berhubungan dengan spin inti I :

$$\mu = \gamma \hbar I \tag{2}$$

Bila suatu inti dengan momen magnet μ diletakkan dalam medan magnet luar B_0 maka akan menimbulkan momen gaya yang akan memutar momen magnetnya mengelilingi medan magnet luar. Besarnya momen gaya τ adalah:

$$\tau = \mu \times B_0 = -\gamma B_0 \mu \sin \theta \tag{3}$$

Momen gaya merupakan perubahan momen putar inti (spin inti) persatuan waktu

$$\tau = \frac{dlz}{dt} = \hbar \frac{dl}{dt} = \hbar I \sin \theta$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \hbar I \sin \theta \omega$$

sehingga diperoleh frekuensi Larmor sebesar

$$\omega_0 = -\gamma B_0 \tag{4}$$

$$v_0 = \gamma B_0 / 2\pi \tag{5}$$

Energi interaksi suatu inti dengan momen dipol μ yang diletakkan dalam medan magnet luar B_0 adalah [13].

$$E = -\gamma m \hbar B_0 \tag{6}$$

Selanjutnya ditinjau sebuah proton yang sama dengan atom hidrogen di dalam medan magnet luar B_0 dengan spin inti $I = 1/2$ maka akan memberikan dua aras energi magnetik yang bersesuaian yaitu [7]

Untuk $m = -1/2$ dengan energi

$$E(-) = + 1/2 \gamma \hbar B_0 \text{ (E tinggi)}$$

Untuk $m=+1/2$ dengan energi

$$E(+) = -1/2 \gamma \hbar B_0 \text{ (E rendah)}$$

Jadi selisih energi magnetik inti adalah

$$\tau \Delta E = \gamma \hbar B_0 = \hbar \omega_0 \tag{7}$$

Transisi antara dua aras energi inti dapat terjadi bila inti ditambahkan medan magnet osilasi dengan frekuensi ω yang arahnya tegak lurus B_0 dengan:

$$\omega = \Delta E / \hbar = \gamma \hbar B_0 / \hbar = \gamma B_0 = \omega_0 \tag{8}$$

jadi $\omega = \omega_0$ disebut frekuensi resonansi, dan ternyata sama dengan frekuensi Larmor, proses ini dikenal dengan prinsip resonansi magnetik inti.

Momen dipol magnet inti μ dalam keadaan acak (random) sebelum diberi medan magnet luar B_0 , sehingga vektor momen dipol magnet inti total nol. Medan magnet luar B_0 mengakibatkan terjadi interaksi spin-kisi sehingga momen dipol magnet inti tersebut berorientasi sejajar dengan medan magnet luar B_0 . Dengan demikian vektor momen dipol magnet total $M \neq 0$. Proses perubahan magnetisasi persatuan volume dari keadaan minimum $M=0$ (tanpa medan magnet luar) menjadi maksimum $M_z + M_0$,

dikenal sebagai mekanisme magnetisasi inti. Apabila pemasangan medan osilasi B_1 dalam selang waktu t yang sangat singkat pada saat resonansi maka precesi M_0 akan berputar dengan sudut: $\theta = \gamma B_1 t$ (radian) dengan sumbu putar B_1 , keadaan ini dikenal dengan teknik NMR pulsa. Dengan mengatur selang waktu t (lebar pulsa), dapat ditentukan $\theta = 90^\circ$ atau $\theta = 180^\circ$. Bila $\theta = 90^\circ$ atau $t = \pi / 2\gamma B_1$ yang disebut dengan pulsa 90° maka magnetisasi akan berputar ke sumbu $+y$. Bila $\theta = 180^\circ$ atau $t = \pi / \gamma B_1$ yang disebut dengan pulsa 180° maka magnetisasi akan berputar ke arah sumbu z (negatif) [4].

Waktu Relaksasi Spin-Kisi (T1)

Bila medan magnet luar B_0 tidak dipasang maka spin-spin inti dari cuplikan dalam gerakannya mengarah sembarang dan kebolehjadiannya untuk mengarah sembarang tersebut adalah sama, sistem ini dikatakan terdegenerasi. Selanjutnya jika sistem diletakkan dalam medan magnet luar B_0 , maka spin-spin cenderung untuk mengarah sejajar dengan B_0 dan tingkat energi spin menjadi non degenerasi. Didalam eksperimen sistem bersinggungan dengan sekeliling yang umumnya dikatakan sebagai kisi, sehingga dengan adanya perubahan arah tersebut spin akan melepaskan energi dari derajat kebebasan spin-spin ke derajat kisi yang akan menuju keadaan setimbang termal dengan mengikuti distribusi Boltzman. Kecepatan tercapainya kesetimbangan termal sangat bergantung pada sifat dari cuplikan, kekuatan interaksi antara spin-spin dengan kisi dan keadaan mikroskopis dari penyusun cuplikan. Didalam cuplikan padat inti-inti menempati secara tegar dan karena itu posisi dan letaknya terisolasi di dalam struktur kisi dan tidak dapat berinteraksi secara kuat dengan sekitarnya. Lain halnya untuk gas dan cairan yang intinya menempati diri kurang terisolasi karena jarak antara atom-atomnya lebih renggang. Tercapainya keadaan kesetimbangan termal ditentukan oleh suatu tetapan waktu (T1) yang disebut mekanisme relaksasinya. Untuk menentukan waktu relaksasi T1 digunakan persamaan [4].

$$M(t) = M_0(1 - e^{-t/T_1}) \tag{9}$$

Persamaan ini digunakan dalam perhitungan waktu relaksasi spin-kisi (T1) metode pulsa $90^\circ/90^\circ$.

Pengukuran Kekuatan Bahan (uji tarik dan uji tekan)

Uji tarik dan uji tekan suatu bahan cuplikan dengan memberikan tegangan terhadap bahan cuplikan yang nilainya tergantung pada gaya yang diberikan dan luas penampang cuplikan yang menerima besarnya gaya tersebut. Jika bahan cuplikan yang di uji kekuatannya ditarik dengan gaya (F) dan luas penampang (A) maka tegangan yang timbul disebut sebagai tegangan tarik (uji tarik). Sebaliknya bila dilakukan penekanan menghasilkan tegangan tekan (uji tekan) yang dapat dituliskan sebagai berikut [2].

$$\tau = F/A \tag{10}$$

dengan τ = besarnya kekuatan tekan/tarik (N/m², Mega Pascal), F = besar gaya yang diberikan atau beban uji maksimal (N) dan A= luas penampang (m², mm²)

METODE PENELITIAN

Penyediaan Bahan Penelitian

Bahan yang dijadikan cuplikan adalah polimer PVC jenis paralon padat yang dibentuk menjadi dua ukuran, yang pertama berbentuk silinder pejal berdiameter 7 mm, panjang 50 mm dan dibuat sebanyak 80 cuplikan. Kemudian diradiasi neutron pada Reaktor Kartini PPNY-BATAN Yogyakarta dengan daya 100 kWatt, lamanya radiasi divariasi dari 0 jam, 1 jam sampai 54 jam dengan interval waktu 6 jam. Proses radiasinya ditempatkan pada bagian lazy Susan dengan fluks rata-rata 4×10^{12} n cm⁻² s⁻¹. Setelah diradiasi neutron cuplikan dimasukkan kedalam tabung berdiameter 10 mm dan panjang 100 mm dan selanjutnya dilakukan pengukuran waktu relaksasi spin-kisi (T1) dengan NMR pulsa. Cuplikan kedua berbentuk empat persegi panjang berjumlah 80 cuplikan dan diradiasi neutron seperti cuplikan pertama. Cuplikan tersebut digunakan untuk uji tarik dan uji tekan bahan cuplikan polimer PVC dengan menggunakan alat United SFM-1 Test Sistem SFM-30 di Laboratorium tehnik mekanika bahan PAU UGM Yogyakarta.

Alat-Alat yang Digunakan dalam Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian yakni Spektrometer NMR pulsa. Jenis NMR pulsa yang digunakan adalah Minispec P.20 buatan Bruker Jerman Barat, yang mempunyai spesifikasi sebagai berikut: frekuensi operasi 20×10^6 Hertz dengan medan magnet $4,69 \times 10^3$ Gauss. Alat NMR pulsa minispec P.20 mempunyai program pulsa 90⁰, 180⁰, 90⁰- τ -90⁰, 180⁰- τ -90⁰, 90⁰- τ -180⁰, CP secuence yang berfungsi untuk mengamati waktu relaksasi cuplikan padat maupun cair. Alat NMR pulsa ini juga dilengkapi dengan osiloskop, tabung pyrex, automatic pulsa delay, pompa air pendingin magnet permanen. Alat lain yang juga digunakan adalah United SFM-Smart-1 Test Sistem SFM-30 yang digunakan untuk mengukur uji tarik dan uji tekan cuplikan sebelum dan setelah di irradiasi neutron.

Tehnik Analisa Data

Untuk memperoleh harga waktu relaksasi spin-kisi (T1) metode pulsa 180⁰/90⁰ digunakan persamaan :

$$M(t) = M_0 \left(1 - 2 \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) \right) \tag{11}$$

Bila persamaan dilinearkan menjadi

$$\ln(M_0 - M(t)) = \ln 2 M_0 + (-t/T_1) \tag{12}$$

Dari persamaan di atas dapat dituliskan dalam bentuk:

$$Y = a_0 + a_1 X$$

dengan

$$Y = \ln(M_0 - M(t))$$

$$a_0 = \ln 2 M_0$$

$$a_1 = -1/T_1$$

$$X = t$$

Untuk menghitung waktu relaksasi spin-kisi metode pulsa 90⁰/90⁰ digunakan persamaan:

$$M(t) = M_0(1 - \exp(-t/T_1)) \tag{13}$$

Bila persamaan dilinearkan menjadi

$$\ln(M_0 - M(t)) = \ln M_0 + (-t/T_1) \tag{14}$$

Dari persamaan di atas dapat dituliskan dalam bentuk:

$$Y = a_0 + a_1 X$$

dengan

$$Y = \ln(M_0 - M(t))$$

$$a_0 = \ln M_0$$

$$a_1 = -1/T_1$$

$$X = t$$

Dengan a₀ dan a₁ adalah koefisien-koefisien regresi linear. Besar waktu relaksasi spin-kisi (T1) dapat dicari melalui koefisien-koefisien regresi linear a₀ dan a₁.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Hasil Pengukuran Waktu Relaksasi Spin-Kisi (T1)

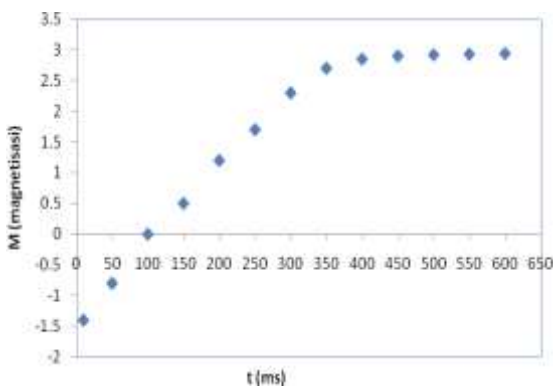
Hasil pengukuran waktu relaksasi spin kisi (T1) dilakukan dengan metode pulsa 180⁰- τ -90⁰ dan metode pulsa 90⁰- τ -90⁰. Hasil pengukuran amplitudo sinyal magnetisasi (dalam satuan 0,5 V) dengan kedua metode pulsa tersebut pada cuplikan polimer PVC untuk radiasi 24 jam terlihat pada tabel 1. Pengamatan data metode 180⁰- τ -90⁰ untuk 90⁰- τ -90⁰ untuk setiap cuplikan dengan pembacaan waktu yang bervariasi sinyal amplitude pada t=0 adalah M₀ dan t = t (milli sekon) adalah M(t) maka diperoleh peluruhan eksponensial. Salah satu contoh grafik hubungan amplitudo sinyal peluruhan terhadap waktu ditunjukkan pada (gambar 1) sedangkan untuk metode 90⁰- τ -90⁰ titik-titik data yaitu amplitudo sinyal M (t) terhadap waktu dapat diamati secara langsung seperti ditunjukkan pada (gambar 2).

Tabel 1. Hasil pengukuran amplitudo sinyal magnetisasi M (dalam satuan 0,5V) sebagai fungsi waktu (t) dengan metode $180^0-\tau-90^0$ untuk 3 cuplikan polimer PVC dengan irradiasi neutron 24 jam

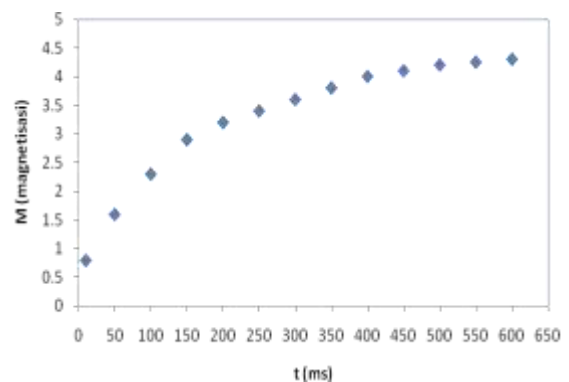
| No | t (ms) | M(0,5V) | | |
|----|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | $(380\pm 2,5)10^{-2}$ | $(390\pm 2,5)10^{-2}$ | $(400\pm 2,5)10^{-2}$ |
| 1 | 10 | -1,4 | -1,4 | -1,5 |
| 2 | 50 | -0,8 | -0,8 | -0,9 |
| 3 | 100 | -0,2 | -0,2 | -0,3 |
| 4 | 150 | 0,3 | 0,2 | 0,3 |
| 5 | 200 | 0,7 | 0,7 | 0,8 |
| 6 | 250 | 1,6 | 1,6 | 1,7 |
| 7 | 300 | 2,6 | 2,5 | 2,6 |
| 8 | 350 | 2,7 | 2,6 | 2,7 |
| 9 | 400 | 2,8 | 2,7 | 2,8 |
| 10 | 450 | 2,9 | 2,8 | 2,9 |
| 11 | 500 | 3,0 | 3,0 | 3,1 |
| 12 | 550 | 3,2 | 3,1 | 3,2 |
| 13 | 600 | 3,3 | 3,2 | 3,3 |

Tabel 2. Hasil pengukuran amplitudo sinyal magnetisasi M (dalam satuan 0,5V) sebagai fungsi waktu (t) dengan metode $90^0-\tau-90^0$ untuk 3 cuplikan polimer PVC dengan irradiasi neutron 24 jam

| No | t (ms) | M (0,5V) | | |
|----|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | $(480\pm 2,5)10^{-2}$ | $(490\pm 2,5)10^{-2}$ | $(500\pm 2,5)10^{-2}$ |
| 1 | 10 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| 2 | 50 | 1,6 | 1,5 | 1,6 |
| 3 | 100 | 2,3 | 2,2 | 2,4 |
| 4 | 150 | 2,9 | 2,8 | 2,8 |
| 5 | 200 | 3,2 | 3,2 | 3,2 |
| 6 | 250 | 3,4 | 3,4 | 3,4 |
| 7 | 300 | 3,6 | 3,6 | 3,6 |
| 8 | 350 | 3,8 | 3,8 | 3,8 |
| 9 | 400 | 4,0 | 4,0 | 4,0 |
| 10 | 450 | 4,1 | 4,1 | 4,1 |
| 11 | 500 | 4,2 | 4,2 | 4,2 |
| 12 | 550 | 4,25 | 4,25 | 4,3 |
| 13 | 600 | 4,3 | 4,3 | 4,35 |



Gambar 1. Grafik hubungan amplitudo sinyal peluruhan magnetisasi (M) sebagai fungsi waktu (t) hasil pengukuran penentuan waktu relaksasi (T1) metode pulsa $180^0-\tau-90^0$



Gambar 2. Grafik hubungan amplitudo sinyal peluruhan magnetisasi (M) sebagai fungsi waktu (t) hasil pengukuran penentuan waktu relaksasi (T1) metode pulsa $90^0-\tau-90^0$

Hasil Perhitungan

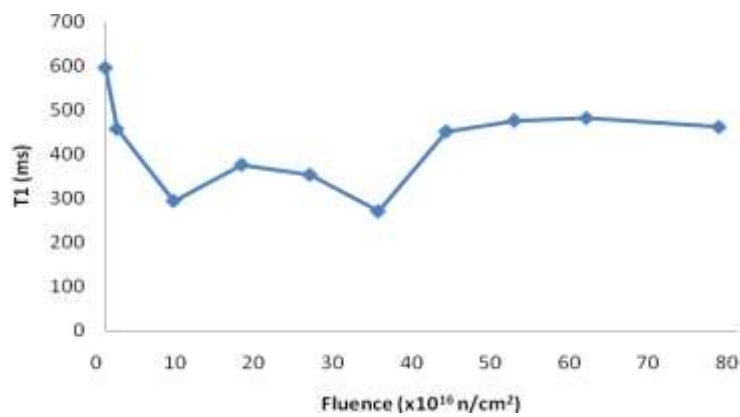
Hasil perhitungan waktu relaksasi (T1)

Hasil perhitungan waktu relaksasi spin-kisi (T1) metode pulsa 180⁰-τ-90⁰ dan waktu relaksasi spin-kisi (T1) metode pulsa 90⁰-τ-90⁰ untuk 3 cuplikan polimer PVC dengan variasi waktu radiasi (fluence) neutron dapat ditunjukkan dalam tabel 3 berikut.

Tabel 3. Hasil perhitungan waktu relaksasi (T1) metode 180⁰-τ-90⁰ dengan variasi waktu radiasi (fluence) neutron 3 cuplikan polimer PVC.

| No | Waktu radiasi (jam) | Fluence (x10 ¹⁶ n/cm ²) | T1 (ms) | | | T1 rata-rata (ms) |
|----|---------------------|--|---------|-------|-------|-------------------|
| 0 | 0 | 0 | 590,3 | 604,8 | 593,6 | 596,3 |
| 1 | 1 | 1,44 | 451,2 | 462,3 | 458,8 | 457,4 |
| 2 | 6 | 8,64 | 287,1 | 296,7 | 298,4 | 294,1 |
| 3 | 12 | 17,28 | 368,2 | 384,4 | 376,7 | 376,4 |
| 4 | 18 | 25,92 | 347,2 | 355,4 | 358,6 | 353,7 |
| 5 | 24 | 34,56 | 261,3 | 279,6 | 270,4 | 270,4 |
| 6 | 30 | 43,20 | 445,6 | 452,1 | 458,1 | 451,9 |
| 7 | 36 | 51,84 | 471,8 | 482,3 | 475,1 | 476,4 |
| 8 | 42 | 60,98 | 488,3 | 477,8 | 480,1 | 482,1 |
| 9 | 54 | 77,76 | 463,9 | 458,6 | 462,7 | 461,7 |

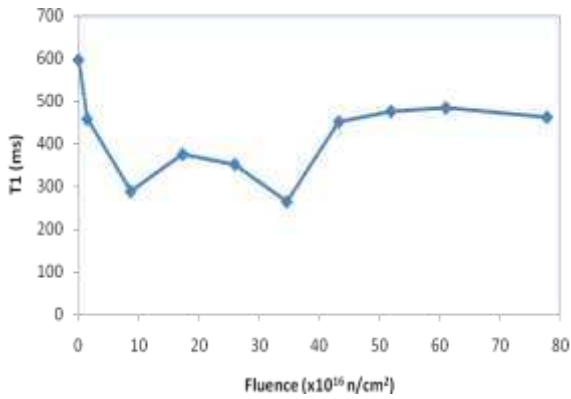
Dengan ralat T1 2%



Gambar 3. Grafik waktu relaksasi spin-kisi (T1) metode pulsa 180⁰-τ-90⁰ vs fluence neutron cuplikan polimer PVC.

Tabel 4. Hasil perhitungan waktu relaksasi (T1) metode pulsa 90⁰-τ-90⁰ dengan variasi waktu radiasi (fluence) neutron 3 cuplikan polimer PVC

| No | Waktu radiasi (jam) | Fluence (x10 ¹⁶ n/cm ²) | T1 (ms) | | | T1 rata-rata (ms) |
|----|---------------------|--|---------|-------|-------|-------------------|
| 0 | 0 | 0 | 592,1 | 601,6 | 594,6 | 596,1 |
| 1 | 1 | 1,44 | 453,2 | 464,8 | 455,1 | 457,7 |
| 2 | 6 | 8,64 | 284,6 | 292,8 | 290,7 | 289,4 |
| 3 | 12 | 17,28 | 366,5 | 381,2 | 378,9 | 375,5 |
| 4 | 18 | 25,92 | 349,8 | 351,5 | 355,4 | 352,2 |
| 5 | 24 | 34,56 | 248,1 | 265,2 | 281,7 | 265,0 |
| 6 | 30 | 43,20 | 444,6 | 456,7 | 452,8 | 451,4 |
| 7 | 36 | 51,84 | 468,9 | 480,2 | 479,5 | 476,2 |
| 8 | 42 | 60,98 | 489,2 | 482,4 | 481,1 | 484,2 |
| 9 | 54 | 77,76 | 465,1 | 460,1 | 462,1 | 462,4 |



Gambar 4. Grafik waktu relaksasi spin-kisi (T1) metode pulsa 90^0 - τ - 90^0 vs fluence neutron cuplikan polimer PVC.

Hasil Perhitungan Uji Tarik dan Uji Tekan

Hasil perhitungan uji tarik dengan spesifikasi cuplikan berbentuk empat persegi panjang dan hasil perhitungan uji tekan dengan spesifikasi cuplikan berbentuk silinder untuk 3 cuplikan polimer PVC, dengan variasi waktu radiasi (fluence) neutron ditunjukkan pada tabel 5 berikut.

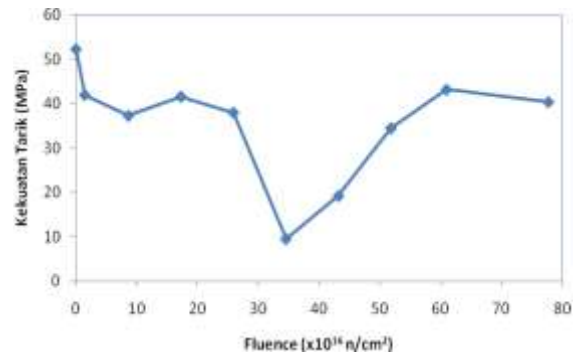
Tabel 5. Hasil perhitungan uji tarik dengan variasi waktu radiasi (fluence) neutron cuplikan polimer PVC

| No | Waktu Radiasi (jam) | Fluence ($\times 10^{16} \text{n/cm}^2$) | Rata-rata Kekuatan tarik (MPa) |
|----|---------------------|--|--------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | $52,3 \pm 1,3$ |
| 1 | 1 | 1,44 | $42 \pm 0,8$ |
| 2 | 6 | 8,64 | $37,3 \pm 0,6$ |
| 3 | 12 | 17,28 | $41,6 \pm 0,8$ |
| 4 | 18 | 25,92 | $38 \pm 0,6$ |
| 5 | 24 | 34,56 | $9,5 \pm 0,1$ |
| 6 | 30 | 43,20 | $19,2 \pm 0,2$ |
| 7 | 36 | 51,84 | $34,5 \pm 0,5$ |
| 8 | 42 | 60,98 | $43,2 \pm 0,9$ |
| 9 | 54 | 77,76 | $40,4 \pm 0,8$ |

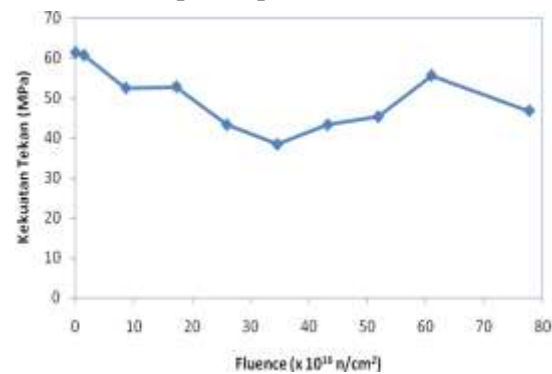
Tabel 6. Hasil perhitungan uji tekan dengan variasi waktu radiasi (fluence) neutron cuplikan polimer PVC

| No | Waktu Radiasi (jam) | Fluence ($\times 10^{16} \text{n/cm}^2$) | Rata-rata Kekuatan tekan (MPa) |
|----|---------------------|--|--------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | $61,3 \pm 1,2$ |
| 1 | 1 | 1,44 | $60,7 \pm 1,2$ |
| 2 | 6 | 8,64 | $52,5 \pm 0,8$ |
| 3 | 12 | 17,28 | $52,8 \pm 0,8$ |
| 4 | 18 | 25,92 | $43,3 \pm 0,4$ |
| 5 | 24 | 34,56 | $38,4 \pm 0,1$ |
| 6 | 30 | 43,20 | $43,3 \pm 0,6$ |
| 7 | 36 | 51,84 | $45,3 \pm 0,7$ |
| 8 | 42 | 60,98 | $55,6 \pm 1,1$ |
| 9 | 54 | 77,76 | $46,8 \pm 0,7$ |

Setelah diperoleh hasil perhitungan antara perubahan kekuatan bahan polimer PVC untuk uji tarik dan uji tekan terhadap variasi waktu radiasi (fluence) neutron kemudian disajikan dalam bentuk grafik seperti pada (gambar 5) berikut.



Gambar 5. Grafik kekuatan tarik vs fluence neutron cuplikan polimer PVC



Gambar 6. Grafik kekuatan tekan vs fluence neutron cuplikan polimer PVC

PEMBAHASAN

Gambar 3 dan gambar 4 terlihat bahwa grafik cuplikan polimer PVC setelah diirradiasi dengan variasi fluence neutron terjadi kenaikan dan penurunan nilai rata-rata waktu relaksasi spin kisi (T1) baik untuk metode pulsa 180^0 - τ - 90^0 maupun metode pulsa 90^0 - τ - 90^0 . Untuk irradiasi neutron dengan fluence 0 sampai $8,64 \times 10^{16} \text{n/cm}^2$ terjadi penurunan rata-rata T1, sedangkan untuk fluence $8,6410^{16} \text{n/cm}^2$ sampai $25,92 \times 10^{16} \text{n/cm}^2$ terjadi kenaikan rata-rata nilai T1, kemudian mencapai nilai minimum pada fluence $34,56 \times 10^{16} \text{n/cm}^2$. Nilai rata-rata T1 adalah $(271,1 \pm 5,4) \text{ms}$ untuk metode pulsa 180^0 - τ - 90^0 dan T1 rata-rata $(263,5 \pm 5,3) \text{ms}$ untuk metode 90^0 - τ - 90^0 . Selanjutnya fluence $34,56 \times 10^{16} \text{n/cm}^2$ sampai dengan $60,96 \times 10^{16} \text{n/cm}^2$ nilai rata-rata T1 naik hingga mencapai maksimum rata-rata T1 $481,9 \pm 10 \text{ms}$ untuk metode pulsa 180^0 - τ - 90^0 dan $482,5 \pm 9,7 \text{ms}$ untuk metode pulsa 90^0 - τ - 90^0 . Setelah terjadi nilai rata-rata T1 maksimum berikutnya terjadi penurunan nilai rata-rata T1 pada fluence neutron $77,76 \times 10^{16} \text{n/cm}^2$. Bila terjadi kenaikan nilai rata-rata T1 berarti waktu pemulihan magnetisasi menuju kesetimbangan

berlangsung lama. Sebaliknya bila nilai T1 turun berarti waktu pemulihan magnetisasi menuju kesetimbangan berlangsung cepat.

Kenaikan dan penurunan nilai T1 untuk kedua metode pulsa tersebut menunjukkan adanya pemutusan ikatan silang (degradasi) dan pembentukan ikatan silang (cross-linking). Pada saat T1 naik terjadi pembentukan ikatan silang (cross-linking) akibat iradiasi neutron, sedangkan pada saat nilai T1 turun terjadi pemutusan ikatan silang (degradasi) akibat iradiasi neutron. Pemutusan ikatan silang yang terbanyak terjadi pada saat T2 minimum dan pembentukan ikatan silang terbanyak terjadi pada saat T1 maksimum.

Pada gambar 5 dan 6 terlihat grafik cuplikan polimer PVC setelah diirradiasi dengan variasi fluence neutron maka pada uji tarik dan uji tekan terjadi kenaikan dan penurunan rata-rata kekuatan tarik dan kekuatan tekan dari bahan cuplikan polimer PVC tersebut. Untuk iradiasi neutron dengan fluence 0 sampai dengan $8,64 \times 10^{16}$ n/cm² terjadi penurunan kekuatan mekanik bahan baik untuk uji tarik maupun uji tekan sehingga yang terbentuk reaksi degradasi. Fluence $8,64 \times 10^{16}$ n/cm². Sampai dengan $25,92 \times 10^{16}$ n/cm² terjadi ikatan silang (cross-linking), kemudian mencapai nilai minimum pada fluence $34,56 \times 10^{16}$ n/cm². Untuk uji tarik adalah $9,5 \pm 0,1$ MPa dan untuk uji tekan adalah $38,4 \pm 0,1$ MPa. Selanjutnya fluence $34,56 \times 10^{16}$ n/cm² sampai dengan $60,96 \times 10^{16}$ n/cm² nilai uji tarik naik hingga mencapai maksimum yaitu $43,2 \pm 0,9$ MPa dan $55,6 \pm 1,1$ MPa untuk uji tekan. Setelah terjadi nilai maksimum berikutnya terjadi penurunan nilai pada fluence $77,76 \times 10^{16}$ n/cm².

Pengaruh radiasi neutron terhadap cuplikan polimer juga dapat dilihat dari perubahan fisik cuplikan. Sebelum radiasi cuplikan polimer PVC berwarna abu-abu, setelah mengalami radiasi terlihat semakin besar fluence neutron cuplikan semakin menggelap atau menjadi hitam. Jadi bertambahnya radiasi menyebabkan terjadinya pelepasan HCl dari molekul rantai polimer PVC.

PENUTUP

Dari data dan pembahasan yang telah diuraikan dapat disimpulkan bahwa pengaruh radiasi neutron pada cuplikan polimer PVC ditandai dengan adanya penurunan dan kenaikan nilai rata-rata T1 untuk kedua metode pulsa, hal ini disebabkan adanya pemutusan ikatan silang (degradasi) dan pembentukan kembali ikatan silang (cross-linking) atau dengan kata lain terjadinya pemutusan dan pembentukan ikatan HCl dari struktur rantai polimer PVC akibat iradiasi neutron.

Pengaruh radiasi neutron pada cuplikan polimer PVC dapat dilihat dari penurunan dan kenaikan nilai rata-rata uji kekuatan tarik dan uji kekuatan tekan, hal

ini juga disebabkan adanya degradasi dan cross-linking dari struktur rantai polimer PVC akibat iradiasi neutron.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Bapak. Prof. Dr. Karyono, S.U dan Bapak Drs. Sudjatmoko, S.U yang telah banyak membantu dalam penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Bloch, P. R. Nuclear Induction, Phys. Rev. 70.460. 1946.
- [2] Chourtney, Thomas, H. Mechanical Behavior of Materials. 1984. Mc Graw-Hill Company.
- [3] Cowd, M. A and Stark, J.G. Polymer Chemistry. 1982. Jhon Murray LTD. London.
- [4] Dhani, A dan Smidt, J. Resonansi Magnetik Nuklir dan Pemakaiannya dalam kedokteran, Jurusan Fisika FMIPA, UGM, Yogyakarta, 1990.
- [5] Djaprie, S. Ilmu dan Teknologi Bahan. 1994. Erlangga.
- [6] Fukusima, E and Roeder, S.B.W. Experiment Pulse NMR, 1981. Addison-Wesley. London.
- [7] Kittel, C. Introduction to solid State Physics, Sixth Edition. 1986. Jhon Wiley & Sons. New York.
- [8] Krane, K.S. Introductory Nuclear Physics. 1988. Jhon Wiley & Sons. New York.
- [9] O'Donnel, J. and Hand Sangster, D.F. Principles of Radiation Chemistry . 1970. Edward Arnold LTD. London.
- [10] Parlin Sinaga, disampaikan pada pelatihan Quality Control alat alat IPA Kerjasama antara Jurusan pendidikan Fisika dengan PT Sugitek Indo Tama.
- [11] Slonim, I. The NMR of Polymer. 1970. Plenum Press. New York.
- [12] Sapto Nugroho Hadi Ancaman Polimer Sintetik Bagi Kesehatan Manusia. 21-01-2004
- [13] Wangness, R.K. Electromagnetic Fields. 2ed Edition. 1986. Jhon Wiley & Son. New York.

BIOGRAFI PENULIS

Dra. Susilawati, M.Si., Ph.D, Lahir di Kotabumi Lampung Utara pada tanggal 31 Agustus 1967, menyelesaikan studi program sarjana pendidikan fisika di UNILA (Universitas Lampung) Bandar lampung pada tahun 1989, program pasca sarjana ilmu fisika di UGM (Universitas Gajah Mada) Jogjakarta 1998 dan program doktoral applied

radiation physics di UPM (Universiti Putra Malaysia) Serdang Malaysia tahun 2005.

Pada Tahun 1992 menjadi staf pengajar di FKIP UNILA pada program studi pendidikan fisika. Sejak tahun 1998 pindah mengajar di program studi pendidikan fisika PMIPA FKIP UNRAM (Universitas Mataram) sampai sekarang. Matakuliah yang di ampu diantaranya pendahuluan fisika inti, fisika modern, modern physics, matriks dan ruang

vektor, fisika matematika I, dan fundamental of physics I.

Sejak tahun 2006 hingga sekarang penulis aktif meneliti tingkat nasional dalam bidang kajian aplikasi radiasi sinar gamma pada polimer film dan pengembangan indikator radiasi sinar gamma serta pengembangan bahan anti radar dan telah mendapatkan hibah penelitian dari Ristek dan dari Dikti yakni penelitian fundamental, strategis nasional dan unggulan perguruan tinggi.