

SEPEREMPAT ABAD PENGEMBANGAN TEKNIK HAMBURAN NEUTRON DI PUSAT PENELITIAN TEKNIK NUKLIR

Marsongkohadi

Pusat Penelitian Sains dan Materi - Badan Tenaga Atom Nasional
dan Jurusan Fisika - Institut Teknologi Bandung

ABSTRAK

SEPEREMPAT ABAD PENGEMBANGAN TEKNIK HAMBURAN NEUTRON DI PUSAT PENELITIAN TEKNIK NUKLIR (PPTN). Makalah ini meninjau ulang pengembangan penelitian zat padat yang menggunakan teknik hamburan neutron di Pusat Penelitian Teknik Nuklir (PPTN), semenjak kritisnya reaktor Triga Mark II sampai sekarang Penelitian dasar dan terapan yang menggunakan teknik hamburan neutron elastik, inelastik dan difus, telah dilakukan untuk meneliti logam, paduan logam, oksida, keramik magnetik, mineral, kristal molekuler serta tekstur dari kawat, batang dan pelat. Pembuatan difraktometer serbuk, difraktometer tekstur, dan spektrometer detektor filter beserta peralatan penunjangnya juga dibahas secara singkat.

ABSTRACT

A QUARTER CENTURY IN THE DEVELOPMENTS OF NEUTRON SCATTERING TECHNIQUE AT THE RESEARCH CENTER FOR NUCLEAR TECHNIQUES (PPTN). This paper reviews the development of condensed matter research using neutron scattering techniques at the Research Center for Nuclear Techniques (PPTN) since the Triga Mark II reactor went critical up to the present. Basic and applied research using elastic, inelastic and diffuse neutron scattering techniques were employed to study metals, oxides, magnetic ceramics, minerals and molecular crystals as well as textures of wires, rods and plates. The construction of neutron powder diffractometers, texture diffractometer, filter detector spectrometer and their auxiliary equipment are also described briefly.

PENDAHULUAN

Penelitian zat padat-zat padat dan zat cair menyangkut studi mengenai struktur kristal, dinamika atom, elektron dan spin magnetik. Hal ini dapat dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan berbagai radiasi, misalnya: sinar-X, elektron, radiasi optik dan neutron termal.

Pada umumnya, data eksperimen terdiri dari distribusi sudut dan energi $S(Q, W)$ yang dinyatakan dalam perpindahan momentum $\hbar Q$ dan energi $\hbar W$ antara radiasi dengan zat padat. Neutron termal sangat ideal untuk penelitian zat padat, karena sifat-sifatnya yang khas yang memungkinkan meliputi daerah yang luas di dalam ruang (Q, W) . Dan salah satu sumber neutron termal yang berintensitas tinggi ialah reaktor nuklir.

Reaktor Triga Mark II di Pusat Reaktor Atom Bandung (PRAB) yang sekarang dikenal dengan Pusat Penelitian Teknik Nuklir (PPTN) adalah reaktor pertama yang dibangun di Indonesia, yang mulai beroperasi pada tahun 1965 dengan daya maksimum 250 Kw dan fluks neutron termal pada teras $\sim 10^{12}$ neutron/cm²/det. Sejak tahun 1971 dayanya ditingkatkan menjadi 1 MW, sehingga

fluks termalnya mencapai $2,5 \times 10^{13}$ neutron/cm²/det.

Sejak reaktor ini beroperasi, usaha pemanfaatan berkas neutron termal untuk penelitian zat padat telah dilakukan, dengan pembuatan beberapa difraktometer neutron, spektrometer neutron dan perangkat penunjang seperti kreo-stat, tungku, magnet dan lain sebagainya.

Penelitian dasar yang telah dilakukan selama 20 tahun antara lain dalam bidang kristalografi, cacat kristal, struktur dan sifat magnetik bahan, dan spektroskopi molekuler. Sedang penelitian terapan terutama dalam mengidentifikasi fasa mineral dan pengukuran tekstur kawat, batang dan pelat dari logam dan paduan logam. Dalam makalah singkat ini hanya dikemukakan beberapa hasil penelitian yang menarik. Sedang pembuatan peralatan berkas neutron, juga dibahas secara singkat.

FASILITAS YANG ADA

a. Reaktor Triga Mark II

Reaktor ini tipe kolam renang, menggunakan elemen bakar moderator U-ZrH dengan pengkayaan uranium 20%. Reflektor grafit dipasang menge-

lilingi teras reaktor dengan kolom termal dipasang dari permukaan reflektor menembus perisai reaktor.

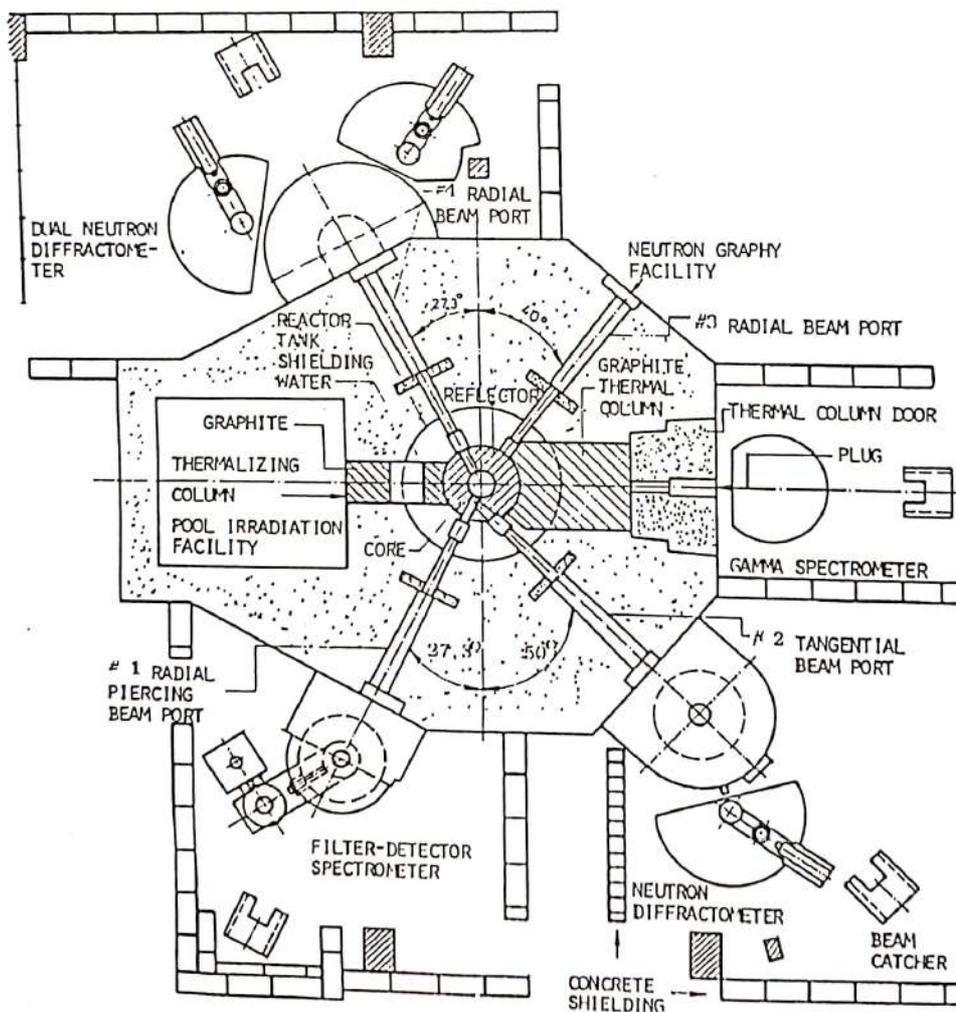
Reaktor ini mempunyai empat buah lubang eksperimental. Dua lubang radial (HR2 dan HR3) berasal dari permukaan reflektor menuju ke permukaan reaktor, sedangkan sebuah lubang tangensial (HT4) menyinggung diameter dalam reflektor menuju ke permukaan reaktor. Sebuah lagi, lubang radial (HP1) dipasang dari daerah teras menuju permukaan reaktor.

Pada mulanya reaktor ini berdaya 250 kW, dan sejak tahun 1971 dayanya ditingkatkan menjadi 1 MW. Dengan daya 1 MW, fluks termal pada CT: $2,5 \times 10^{13}$ neutron/cm²/detik, HP1: $7,9 \times 10^6$ neutron/cm²/detik, HR2: $6,8 \times 10^6$ neutron/cm²/detik, HR3: $6,0 \times 10^6$ neutron/cm²/detik, dan HT4: $3,9 \times 10^6$ neutron/cm²/detik. Untuk melakukan eksperimen hamburan neutron digunakan

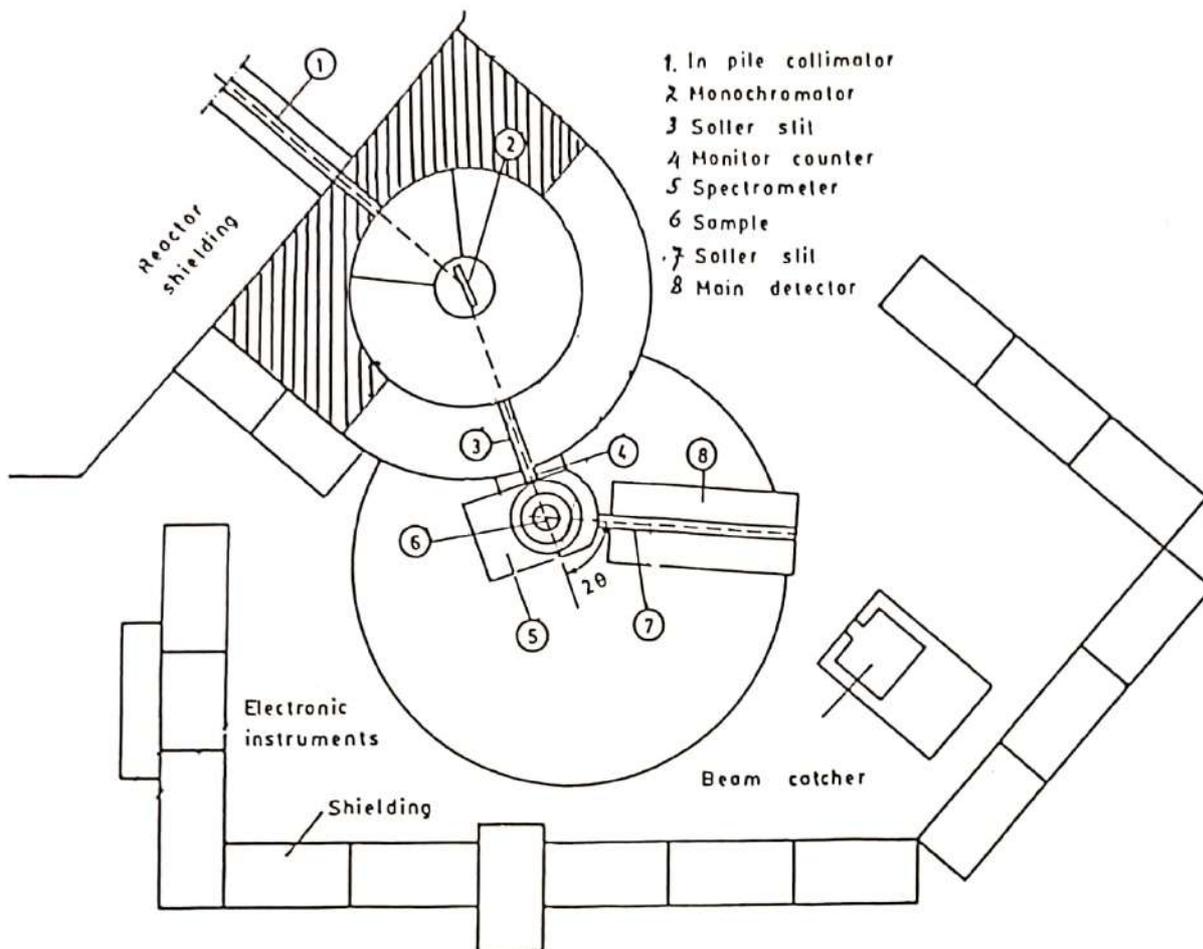
lubang-lubang eksperimental HP1, HR2, dan HT4 sedangkan HR3 digunakan untuk radiografi neutron. Adapun kolom termal digunakan untuk eksperimen reaksi inti. Bagan Reaktor Triga Mark II dengan fasilitas eksperimental untuk penelitian zat mampat dapat dilihat dalam gambar 1.

b. Difraktometer Serbuk I [1]

Merupakan difraktometer yang pertama dibangun di Bandung, yaitu pada tahun 1966 dan selesai tahun 1970. Monokromatornya terdiri dari kristal tunggal Pb (111) atau Cu (111) dengan ukuran 3" x 2" x (3/8)" dan dengan tebaran mosaik 20'. Kolimator Soller pertama dan kedua masing-masing mempunyai sudut divergensi horisontal 24' dan 22'. Pengukuran pola difraksi dilakukan dengan sebuah spektrometer sinar-X buatan Picker yang diberi lengan panjang untuk pemasangan detektor utama BF₃ dengan perisai parafin yang dicampur dengan boraks. *Step Scanning* dila-



Gambar 1 . Bagan Reaktor Triga Mark II dengan fasilitas eksperimental



Gambar 2. Bagan difraktometer serbuk I

kukan secara manual. Alat ini khususnya digunakan untuk pendidikan (tugas akhir mahasiswa). Setelah beroperasi selama delapan tahun, alat ini dibongkar dan dibuat difraktometer baru yang lebih canggih. Bagan difraktometer serbuk I ini dapat dilihat pada gambar 2.

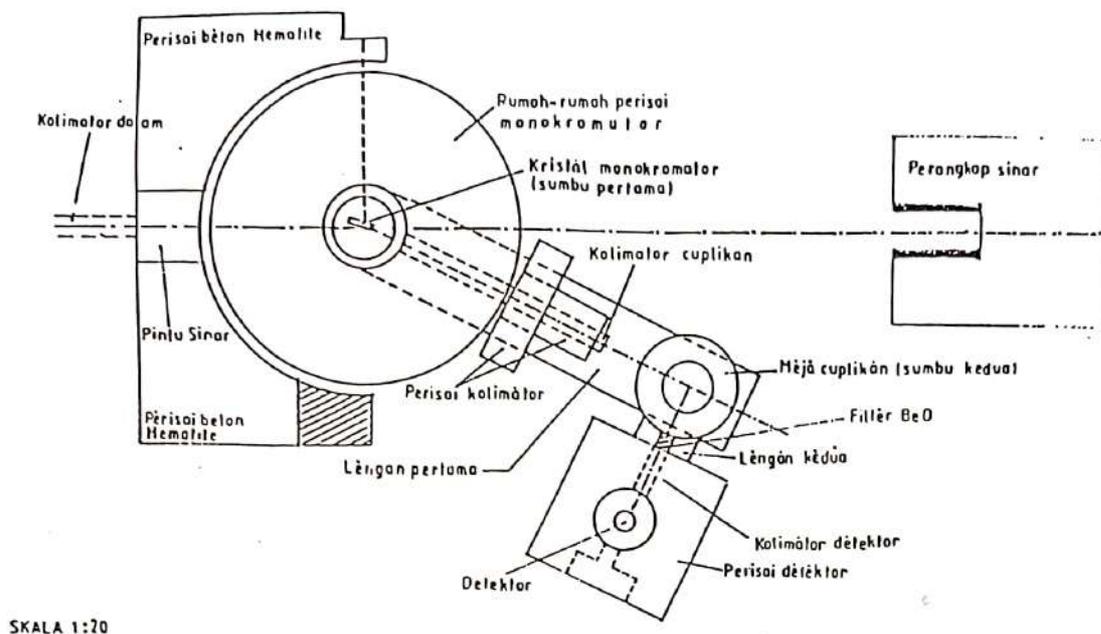
c. Spektrometer Detektor Filter [2]

Dengan ditingkatkannya daya reaktor menjadi 1 MW, maka terbukalah kesempatan untuk melakukan percobaan hamburan inelastik. Untuk penelitian dinamika atom dalam kristal, biasanya dilakukan dengan Spektrometer Bersumbu Tiga (*Triple Axes Spectrometer*, TAS) dan membutuhkan fluks lebih tinggi dari 10^{13} n/cm²/det. Akan tetapi dengan reaktor Triga Mark II (1 MW) teknik ini masih dapat dilakukan asal saja dipilih peralatan yang sesuai dengan Spektrometer Detektor Filter yang selesai dibuat dan dioperasikan pada tahun 1976. Pembuatan komponen mekanik yang memerlukan ketelitian tinggi, dilakukan di BHABHA ATOMIC RESEARCH CENTER, INDIA. Gambar 3 menunjukkan bagan alat ini. Monokromator Cu(111) dapat diputar untuk

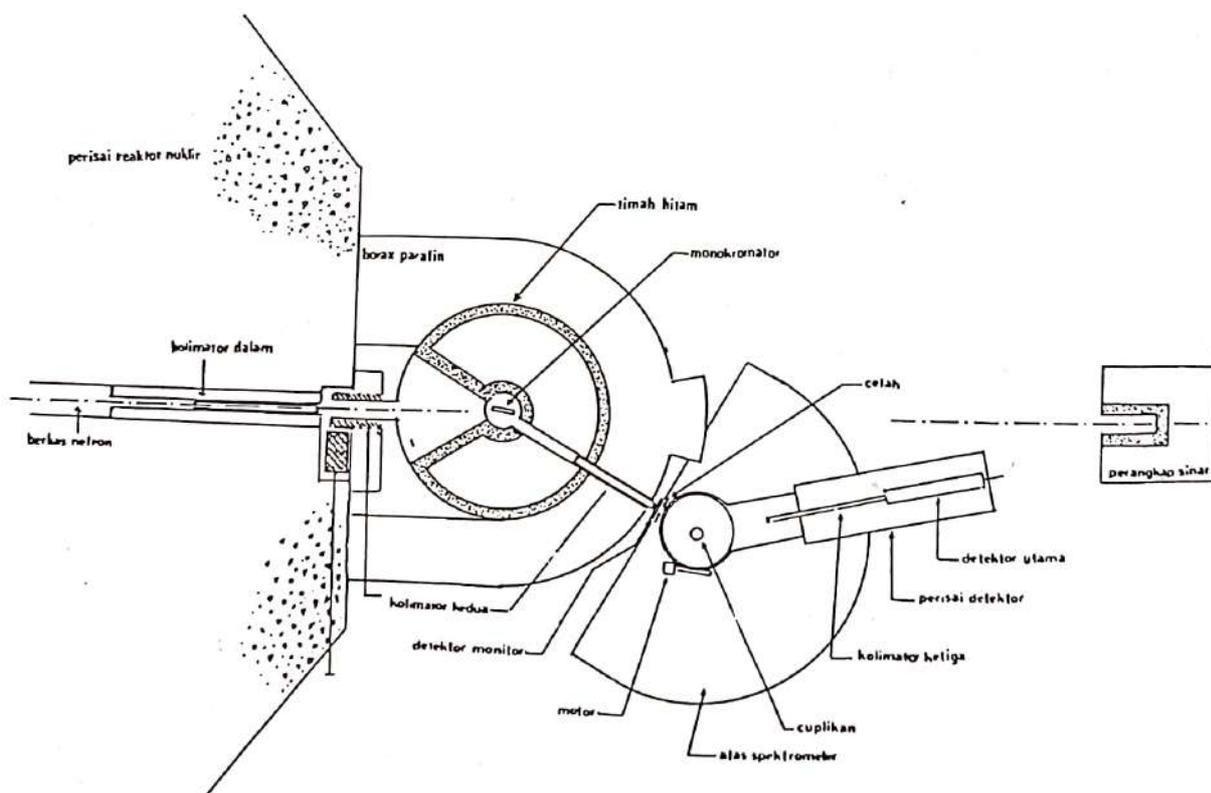
mengubah energi neutron datang E_0 . Neutron terhambur dengan sudut 90° , dianalisis energinya dengan suatu analisator yang terdiri dari filter BeO dengan detektor BF₃ di belakangnya yang dipasang vertikal. Filter polikristal BeO yang mempunyai penampang hamburan besar dan suhu Debye tinggi dapat dipakai sebagai diskriminator energi, karena hanya mentransmisikan neutron yang berenergi antara nol dan energi potong Bragg (Bragg cut-off energy), E_{∞} . Nilai E_{∞} untuk BeO, adalah 3,7 meV, dan energi rata-rata filternya adalah $\langle E \rangle = 2,5$ meV. Jadi neutron yang ditransmisikan berenergi antara 0 - 2,5 meV. Untuk menentukan spektrum neutron terhambur E_0 divariasi dengan memutar monokromator dengan langkah $(1/8)^\circ$. Puncak-puncak akan diperoleh apabila dipenuhi syarat:

$$E_0 - \langle E \rangle = hW_j$$

Di sini W_j ialah frekuensi dari modus j yang diberi energi dari neutron datang. Untuk pengumpulan data, baik cacahan cuplikan maupun latar belakang secara otomatis, telah dibuat alat pengontrol elektronik [3,4].



Gambar 3. Bagan spektrometer detektor filter



Gambar 4. Bagan difraktometer serbuk II

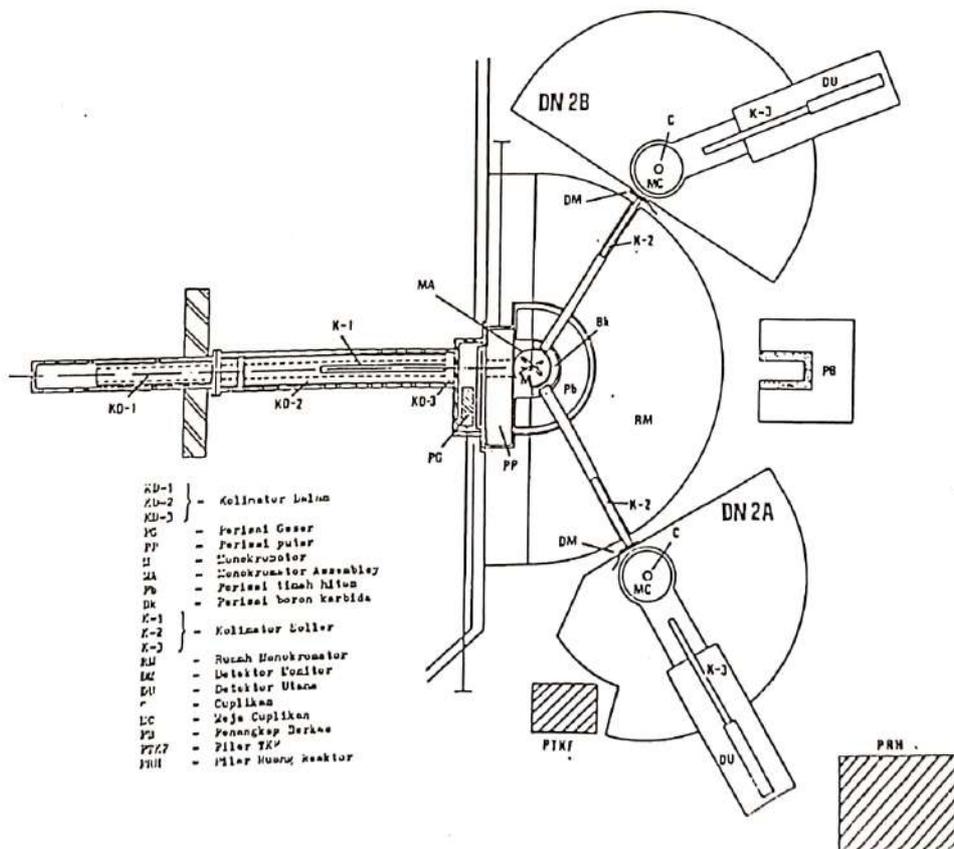
d. Difraktometer Serbuk II [5,6]

Difraktometer ini dibuat untuk menggantikan difraktometer serbuk I. Selain luminositas dan resolusinya ditingkatkan, alat ini khususnya dirancang untuk penelitian bahan magnetik. Jadi pada meja cuplikan harus dapat dipasang kriostat, pemanas, dan magnet yang berat. Rumah monokromator dirancang dengan perisai yang kuat untuk menekan latar belakang serendah mungkin. Resolusi dan luminositasnya ditingkatkan dengan menyesuaikan divergensi sudut dari ketiga kolimator dengan tebaran mozaik dari monokromator. Selain itu resolusinya dapat ditingkatkan lagi dengan memilih perbandingan jarak antara sumber dengan monokromator dan antara monokromator dengan cuplikan, sesuai dengan perhitungan teoretis. Pengukuran pola difraksi dilakukan secara otomatis. Alat ini mulai dibuat tahun 1978 dan selesai dikalibrasi tahun 1980. Bagan dari difraktometer ini dapat dilihat dalam gambar 4.

e. Difraktometer Tekstur

Antara tahun 1980-1982, reaktor tidak dapat

dioperasikan dengan daya penuh karena alasan teknis. Oleh karena itu percobaan hamburan inelastik tidak dapat dilaksanakan. Sehingga timbul pemikiran menggunakan spektrometer neutron untuk pengukuran tekstur. Untuk ini filter BeO diambil dan spektrometer digunakan sebagai difraktometer, dengan memasang monokromator pada sudut tertentu sehingga menghasilkan neutron monokromatik dengan $\lambda = 1,26$ angstrom. Sebuah goniometer tekstur (Eulerian Cradle) yang dibuat di Institute of Nuclear Physics and Techniques, Cracow, Polandia dipasang pada meja cuplikan. Cuplikan yang dipasang pada goniometer ini mengalami dua gerakan, yakni rotasi mengelilingi porosnya (rotasi β), yakni rotasi terhadap sumber ND (Normal Direction) dan rotasi mengelilingi lingkaran goniometer (rotasi α), yakni rotasi terhadap sumber TD (Transverse Direction). Rotasi α dikendalikan oleh *stepping motor* biasa, sedangkan rotasi β dikendalikan oleh *stepping motor* khusus. Untuk pengukuran gambar kutub dibutuhkan rotasi α dan β berulang



Gambar 5. Bagan difraktometer kembar

kali, sehingga prosedurnya harus dilakukan secara otomatis baik *off-line* maupun *on-line*. Otomatisasi pengumpulan data tekstur *on-line* dilakukan dengan menghubungkan difraktometer dengan komputer mini PDP 11/34A dan sistem pencacah *Canberra Datanim System*. Komunikasi antara keduanya dikendalikan oleh *Telecomputer Interface 6726* dengan empat sub rutin. Dalam hubungan tak langsung (*off-line*), instruksi dibaca melalui pita berlubang oleh pembaca pita TTY (*Teletype Model ASR33*). Difraktometer Tekstur ini sampai sekarang berjalan dengan baik dan telah menghasilkan banyak gambar kutub.

f. Difraktometer Kembar [10]

Karena lubang eksperimental yang belum terpakai tinggal satu yakni HR2, maka timbul pemikiran menggunakannya untuk dua difraktometer sekaligus, dengan memasang dua monokromator. Untuk menghindari atenuasi neutron yang ditransmisikan melalui monokromator pertama, maka kedua monokromator tersebut dipasang satu diatas yang lain. Kedua monokromator dipasang pada *Monochromata Assembly* dan masing-masing dapat dikendalikan dengan gerakan translasi x,y,z; rotasi mengelilingi sumbu vertikal, rotasi mengelilingi sumbu horizontal dan maju mundur. Kedua monokromator tersebut Cu(220) dan Cu(311) berukuran 1 cm x 7 cm x 12 cm. Kedua difraktometer berjenis sama, yang pertama untuk pengukuran tekstur dan yang kedua untuk keperluan serbaguna. Pencacahan dilakukan secara otomatis, baik dengan hubungan tak langsung (*off-line*) maupun langsung (*on-line*). Percobaan pendahuluan menggunakan difraktometer ini telah dilakukan, akan tetapi hasilnya belum memuaskan karena mekanisme pengendalian gerak kedua monokromator kurang baik. Bagan dari difraktometer ini dapat dilihat dalam gambar 5.

g. Peralatan Pembantu

Kadang-kadang dalam suatu penelitian, lingkungan cuplikan harus diubah misalnya didinginkan, dipanaskan, atau diberi medan magnet. Untuk ini diperlukan peralatan pembantu seperti kriostat, pemanas atau magnet.

Kriostat Nitrogen Cair

Kriostat nitrogen cair pertama dibuat dalam tahun 1975 [11]. Dengan dinding vakum bertekanan 2×10^{-4} torr, penguapan nitrogen cair rata-rata 1,3 liter/jam. Untuk pengukur suhu cuplikan telah diteliti beberapa jenis resistor karbon dan dioda sambungan p-n [12]. Suhu terendah cuplikan yang dapat dicapai ialah 110° K. Dari pengalaman pembuatan kriostat pertama, maka dibuatlah suatu

kriostat yang lebih efisien [6]. Penguapan nitrogen cair rata-rata (0,4 liter/jam) dicapai dengan tekanan dalam dinding vakum sebesar 6×10^{-6} Torr. Dengan pengisian nitrogen cair setiap 24 jam suhu cuplikan 80° K, dapat dipertahankan selama 10×24 jam.

Pemanas Cuplikan

Untuk penelitian zat mampat pada suhu tinggi telah dibuat alat pemanas cuplikan [13]. Pemanasan dilakukan dengan lilitan kawat nikelin yang dialiri arus yang dipasang di atas dan di bawah tempat cuplikan vanadium. Seluruh sistem tersebut berada dalam ruang hampa dengan tekanan 10^{-3} Torr dan dengan arus 7 Ampere. Suhu cuplikan dapat mencapai 500° C.

Magnet untuk Difraksi Neutron

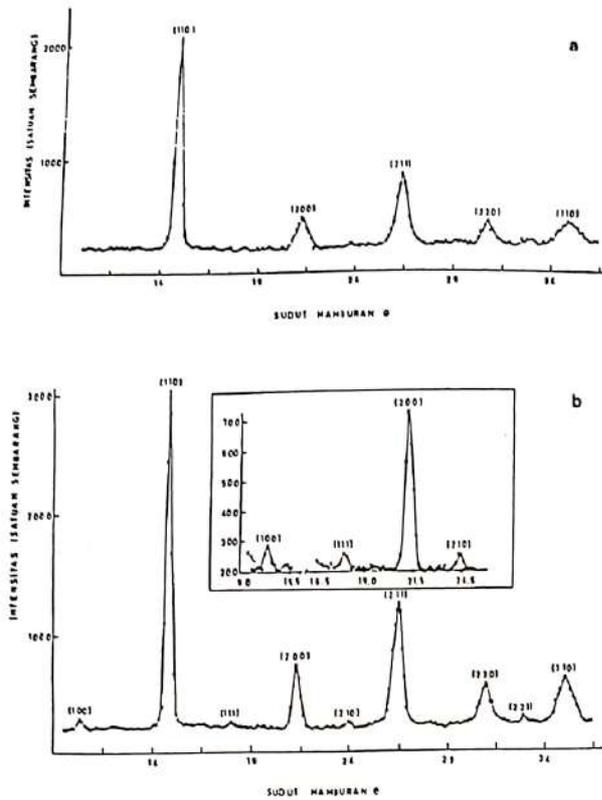
Untuk penelitian bahan magnetik telah dibuat sebuah elektromagnet yang dapat memagnetisasi cuplikan sampai jenuh [6]. Bentuk kumparan harus konik supaya tidak menghalangi neutron datang dan terhambur. Pendinginan dilakukan dengan membagi kumparan dalam tiga bagian yang masing-masingnya dibatasi dengan pelat pendingin. Karena berat magnet mencapai 350 kg maka alat itu tidak dapat dipasang langsung di atas meja cuplikan. Suatu meja khusus yang dapat berputar mengikuti perputaran lengan difraktometer telah dibuat. Celah kutub dapat dipilih antara 3,4 cm, 4,0 cm dan 6,0 cm dengan memasang topi kutub yang sesuai. Dengan celah kutub 3,4 cm medan magnet yang besarnya 0,1 tesla dapat dicapai dengan arus magnetisasi 25 Ampere. Untuk ini telah dibuat suatu daya khusus yang menghasilkan arus 30 Ampere.

PENELITIAN ZAT MAMPAT DI REAKTOR TRIGA MARK II

Penelitian zat mampat di reaktor Triga Mark II sejak reaktor tersebut beroperasi, dapat dikelompokkan dalam beberapa bidang yakni: kristalografi, cacat kristal, struktur dan sifat magnetik, spektroskopi molekul dan analisis tekstur. Dalam makalah ini hanya akan dikemukakan beberapa hasil penelitian yang menarik.

a. Kristalografi

Bahan yang pertama-tama diteliti setelah difraktometer serbuk-I beroperasi ialah logam Ni dan Fe [1], kemudian struktur paduan logam Fe-Cr [14]. Penelitian yang lebih teliti dan terinci dengan difraksi sinar-X dan neutron, misalnya terhadap Ni, Al dan Cu telah dilakukan dengan difraktometer serbuk-II [15]. Dan dengan berkembangnya fasilitas penelitian, telah diteliti antara



Gambar 6. Pola difraksi β' -CuZn dan β -CuZn

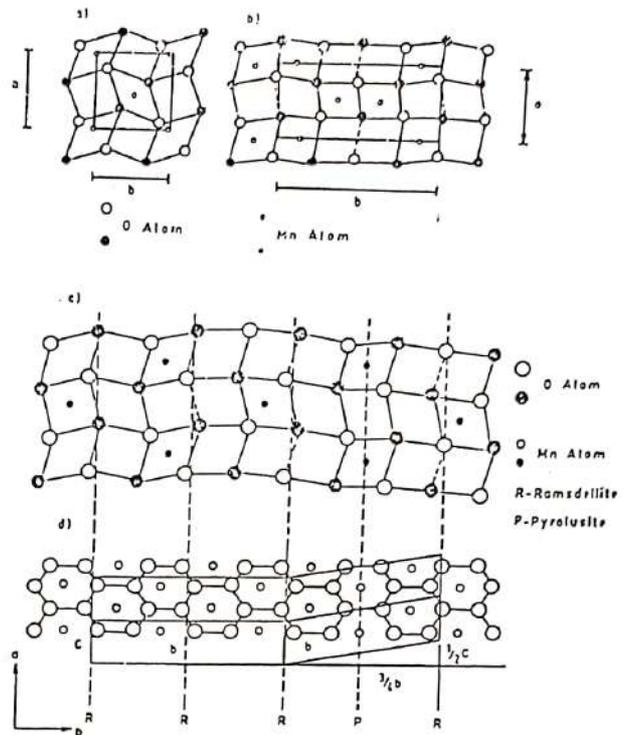
lain: struktur (α - Fe_2O_3) [16], efek keteraturan dalam CuZn [17] dan analisis struktural mineral MnO_2 [18]. Secara singkat dikemukakan hasil penelitian CuZn dan mineral MnO_2 .

Efek Keteraturan dalam CuZn [17]:

Telah dibuat paduan logam Cu-Zn dalam fasa β (tak beraturan) dan β' (teratur). Pada fasa teratur, sel satuannya berbentuk kubus berpusat badan (bcc) dengan atom Zn dipusat badan dan atom-atom Cu menempati sudut-sudutnya. Pada fasa tak beraturan, atom-atom Cu dan Zn mempunyai kebolehjadian yang sama untuk menempati semua titik kisi.

Pola difraksi fasa β terdiri dari puncak-puncak fundamental, (111), (200), (211), (220), dan (310), (gambar 6.a). Pola difraksi fasa β' selain terdiri dari puncak-puncak fundamental, juga timbul puncak-puncak kisi super (100), (111), (210), (gambar 6.b). Hal ini sesuai dengan harga faktor strukturnya.

Dari hasil percobaan dapat ditentukan parameter keteraturan rentang panjang (long-range order parameter) sebesar $S = (1,00 \pm 0,02)$.



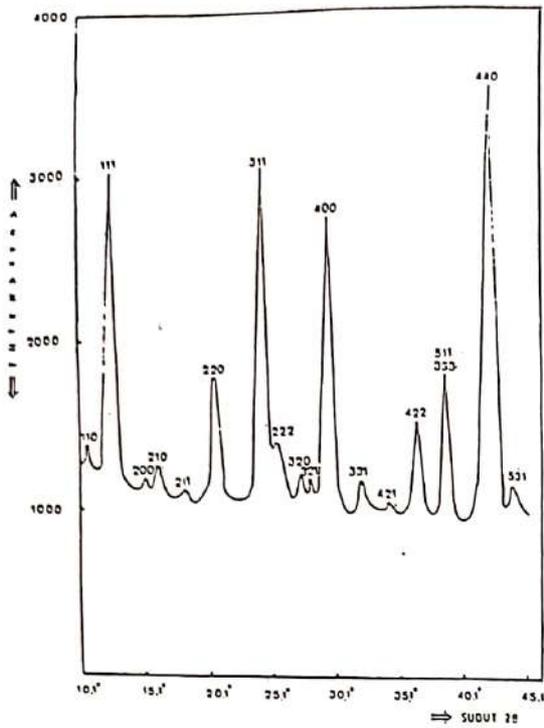
Gambar 7. Struktur pyrolusite dan ramsdellite

Dalam Mineral MnO_2 [18]

Mineral MnO_2 mempunyai tujuh polymorf, dengan dua fasa utamanya pyrolusite (β - MnO_2) dan ramsdellite. Fasa lain yang penting dalam industri batere ialah γ - MnO_2 . Gambar 7 menunjukkan struktur ketiga fasa tersebut dengan unit strukturnya oktahedron MnO_6 . Difraksi sinar-X dan neutron telah digunakan untuk mencari ketiga fasa mineral MnO_2 dari Karangnunggal, Jawa Barat. Puncak-puncak pyrolusite dan ramsdellitinya jelas dan tajam, sedangkan pada γ - MnO_2 ada beberapa puncak yang tetap tajam sesuai dengan puncak ramsdellite, tetapi ada beberapa puncak pula yang melebar dan tergeser. Hal ini disebabkan oleh struktur lapis yang terdiri dari lapisan pyrolusite dan ramsdellite yang didistribusikan secara acak. Dari pergeseran puncak dapat ditentukan konsentrasi pyrolusite dalam ramsdellite.

b. Cacat Kristal

Dengan difraksi neutron dapat diteliti cacat kristal. Misalnya, kekosongan (vacancy) pada γ - Fe_2O_3 [19] dapat menimbulkan puncak-puncak super kisi. Walau demikian cacat kristal dapat juga diteliti dengan hamburan difus. Suatu percobaan



Gambar 8. Pola difraksi $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$

semacam ini, tetapi bukan percobaan cacat kristal, telah dilakukan pada 20 Mn - 80 Cu [20] yang membuktikan bahwa dengan dimasukkannya Mn ke dalam matrix Cu akan menyebabkan bertambahnya hamburan difus. Hal ini disebabkan karena adanya keteraturan rentangan pendek atomik dan magnetik. Percobaan lain yang telah dilakukan ialah penentuan ukuran partikel dalam UO_{2+x} dengan pelebaran pada puncak pola difraksinya. Di bawah ini akan dikemukakan hasil penelitian kekosongan pada $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

Distribusi Kekosongan dalam $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [19]:

$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dibuat dari proses oksidasi Fe_3O_4 pada suhu 400 °C selama dua jam. Fe_2O_3 dan Fe_3O_4 mempunyai struktur yang sama yaitu spinel terbaik dengan parameter kisi yang berbeda, masing-masing $a = 8,3306$ Angstrom dan $a = 8,3804$ Angstrom. Karena $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ mengandung kekosongan pada titik-titik kisinya, maka timbulah puncak-puncak super kisi: (110), (200), (210), (211), (320), dan (421) yang tidak muncul pada pola difraksi Fe_3O_4 (gambar 8). Dari hasil perhitungan dapat ditarik kesimpulan bahwa distribusi kekosongan berada pada posisi oktahedral, dengan demikian menyokong pendapat Ueda dan Hasegawa.

C. Struktur dan Sifat Magnetik Bahan

Berbeda dengan sinar-X, neutron mampu-

nyai spin magnetik, sehingga dapat digunakan untuk menentukan orientasi momen magnetik didalam kristal. Dalam penelitian bahan fero dan ferimagnetik dibutuhkan medan magnet untuk memisahkan puncak nuklir dan puncak magnetik. Akan tetapi untuk bahan antiferomagnetik, kedua jenis puncak tersebut akan terpisah dengan sendirinya. Karena itu bahan magnetik yang pertama kali diteliti di PPTN ialah NiO [22,23] dan MnO [24] yang bersifat antiferomagnetik.

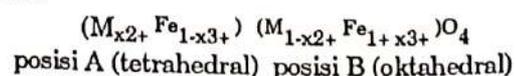
Ferit spinel, merupakan keramik magnetik lunak yang banyak digunakan dalam industri elektronik. Telah diteliti ferit nikel NiFe_2O_4 [25], ferit seng ZnFe_2O_4 [26] dan ferit campuran $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 1$). Penelitian yang menentukan parameter oksigen dalam ferit Fe_3O_4 , ZnFe_2O_4 dan MgFe_2O_4 telah dilakukan [29,30]. Ferit keras yang telah dibuat dan diteliti ialah ferit heksagonal tipe M, $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ [31]. Bahan ini dapat digunakan sebagai magnet permanen. Nitrida logam transisi Fe_4N dan Mn_4N [6,32,33] telah diteliti dengan neutron tak terpolarisasi maupun terpolarisasi. Selain itu Mn_4N menunjukkan adanya kemampuan mempolarisasi neutron sehingga berkemungkinan untuk dapat digunakan sebagai polarisator [34]. Di bawah ini akan diuraikan dengan singkat hasil-hasil penelitian pada NiO, ZnFe_2O_4 dan $\text{Zn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$, Nitrida besi, dan Mangan dengan Mn_4N sebagai polarisator.

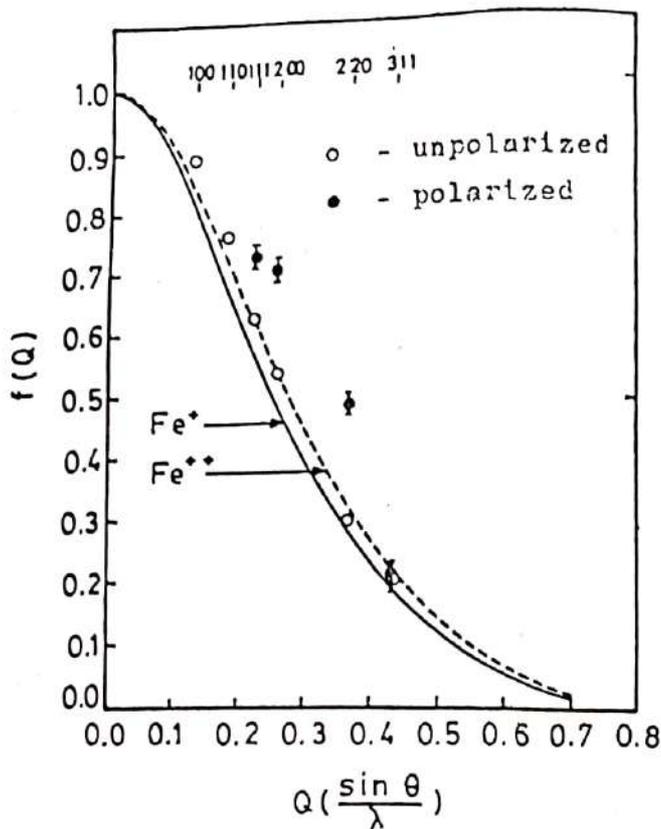
NiO [22,23]:

NiO termasuk grup oksida besi yang bersifat antiferimagnetik dengan suhu Neel 523° K. Pola difraksi NiO menunjukkan timbulnya puncak-puncak magnetik (111)m, (311)m dan (333)m yang terpisah dari puncak-puncak nuklir. Apabila NiO mengalami transisi dari para magnetik ke antiferomagnetik, maka terjadilah deformasi kristal dari kubik ke rhombohedral. Hal ini dapat dilihat dari adanya pemisahan puncak-puncak nuklir (222) dan (440). Pemisahan puncak (440) menjadi (440) dan (440), walaupun kecil dapat diamati. Dari pemisahan puncak tersebut dapat ditentukan $a_m = 8,398$ Angstrom dan $\alpha = 90^\circ 7'$. Jadi $a_m = 2a_{\text{chem}}$ sesuai dengan bahan antiferomagnetik.

ZnFe_2O_4 , NiFe_2O_4 dan $\text{Zn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 1$) [27,28]

Penelitian ferit spinel pada khususnya dan keramik magnetik pada umumnya sangat menarik, karena bahan ini banyak dipakai dalam industri. Secara umum ferit dapat dirumuskan sebagai berikut:

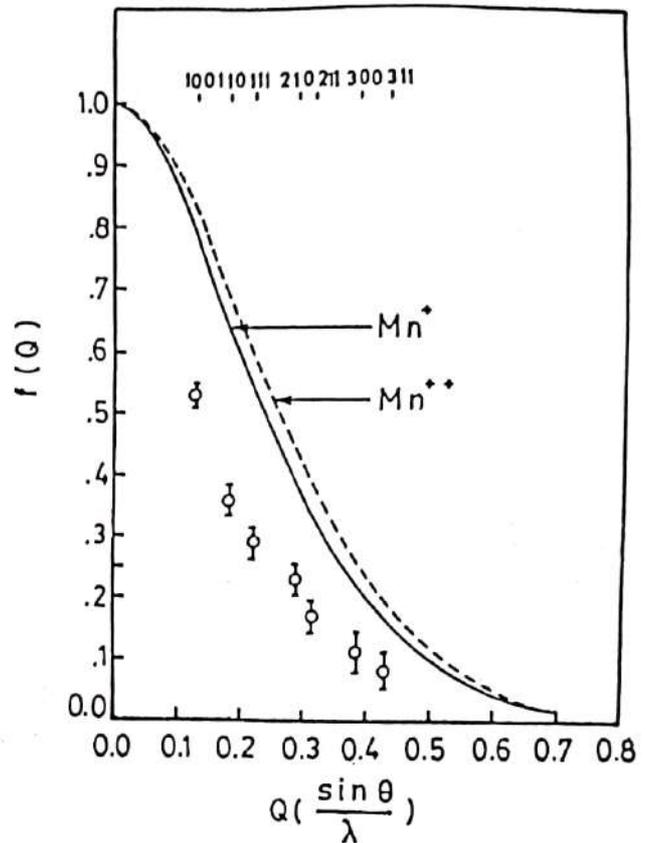




Gambar 9a. Faktor bentuk magnetik FeII dibandingkan dengan Fe²⁺ dan Fe³⁺

di mana M adalah logam bervalensi dua. Apabila $x=1$, strukturnya spinel normal, apabila $x=0$ strukturnya spinel inverse komplit. Dari analisis pola difraksinya diturunkan bahwa ferit seng, normal $(Zn^{2+})(Fe_2^{3+})O_4$ dengan $a=(8,415 \pm 0.004)$ Angstrom dan $B=0.79$ Angstrom. Sifat magnetiknya ditentukan oleh interaksi (B-B). Karena ion Zn^{2+} non-magnetik, dan interaksi (B-B) lemah, maka ferit seng bersifat paramagnetik. Hal ini ditunjukkan oleh adanya hamburan difus pada $2\theta < 20^\circ$. Strukturnya ditentukan lebih teliti lagi dengan memasukkan parameter oksigen 0,385 Angstrom [30]. Ferit nikel menunjukkan struktur spinel inverse $(Fe^{3+})(Ni^{2+}Fe^{3+})O_4$ dengan $a=(8,344 \pm 0,004)$ Angstrom dan $B=0,813$ Angstrom. Karena interaksi (B-B) lebih lemah dari interaksi (A-B) maka momen magnetik Fe^{3+} dalam posisi tetrahedral berlawanan arah dengan momen magnetik Fe^{3+} dan Ni^{2+} dalam posisi oktahedral, sehingga ferit nikel bersifat ferimagnetik.

Telah dibuat cuplikan ferit tercampur $Zn_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ dengan $x=0,25; 0,50; 0,75$. Distribusi kation ferit campuran ialah $(Zn_{x2+}Fe_{1-x3+})(Ni_{1-x2+}Fe_{1+x3+})$

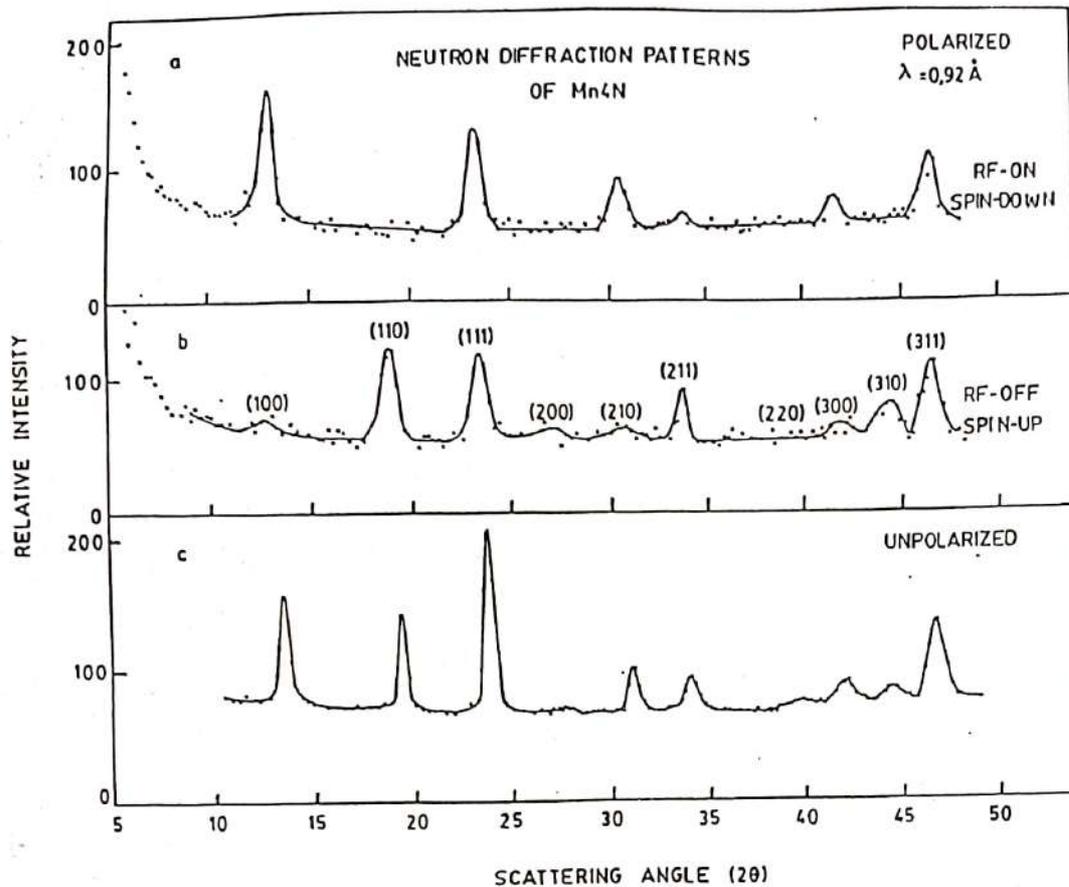


Gambar 9b. Faktor bentuk magnetik MnII dalam Mn₄N

Dalam hal ini, interaksi (A-A) dan (B-B) menjadi kuat dan sebanding dengan interaksi (A-B). Oleh karena itu kesi B pecah menjadi B₁ dan B₂ masing-masing dengan momen magnetik m_{B1} dan m_{B2} yang membuat sudut Yafet-Kittel dengan momen magnetik di A. Menurut perhitungan, model Yafet Kittel ini akan dapat dilihat dari timbulnya puncak-puncak (200) dan (220) pada komposisi $x=0,75$. Akan tetapi dalam percobaan ini, kedua puncak tidak muncul.

Nitrida Logam Transisi, Fe₄N dan Mn₄N [6,32,33]:

Nitrida logam transisi Fe₄N dan Mn₄N mempunyai sifat sangat menarik dengan pengaturan masing-masingnya fero dan ferimagnetik. Struktur kristalnya perovskite Pm3m dengan atom-atom logamnya membentuk matrix fcc dan atom nitrogennya pada pusat muka. Telah ditentukan pada Fe₄N, momen magnetik atom sudut Fe₁ sebesar 2,80 μ_B yang searah dengan momen magnetik atom pusat muka Fe₁ sebesar 1,78 μ_B . Pada Mn₄N, momen magnetik Mn₁ dan Mn₁₁ masing-masing sebesar 3,54 μ_B dan 0,91 μ_B antiparalel. Karena lingkungan atom-atom pada sudut dan pusat muka berbeda, maka besar momen magnetiknya juga berbeda. Untuk



Gambar 10. Pola difraksi neutron terpolarisasi cuplikan Mn₄N

membuktikan hal ini telah diukur faktor bentuk magnetik kedua bahan dengan neutron terpolarisasi. Hasilnya (gambar 9 a, b) menunjukkan bahwa faktor bentuk Fe₁₁ pada Fe₄N melebar dibandingkan faktor bentuk atom Fe₁, artinya bahwa rapat momen Fe₁₁ berkontraksi, sehingga rapat elektron 3d pada Fe₁ dan Fe₁₁ terlokalisasi. Jadi tidak terjadi tumpang tindih fungsi gelombang 3d secara langsung sehingga bersifat feromagnetik. Sebaliknya pada Mn₄N, faktor bentuk Mn₁₁ lebih tajam dari faktor bentuk Mn₁. Ini berarti bahwa distribusi elektron 3d pada Mn₁₁ lebih tersebar bila dibandingkan dengan distribusi pada Mn₁ sehingga momen magnetik atom Mn₁ dan Mn₁₁ antiparalel. Hal ini sesuai dengan model pita yang dikemukakan oleh Jardin dan Labbe. Analisis profil Rietveld telah diterapkan pada pola difraksi Mn₄N [42].

Kemungkinan Penggunaan Mn₄N Sebagai Polarisor Neutron [34]:

Nitrida mangan Mn₄N telah diteliti dengan teknik difraksi neutron tak terpolarisasi maupun terpolarisasi. Ternyata kedua refleksi (100) dan

(110) dapat menghasilkan hampir 100% neutron terpolarisasi serta monokromatik

Lebih lanjut diketahui bahwa kedua refleksi menghasilkan polarisasi yang berlawanan arah (gambar 10). Refleksi (100) hanya memantulkan neutron dengan polarisasi yang berlawanan arah dengan magnetisasi, sedangkan refleksi (110) polarisasinya searah dengan magnetisasi. Hal ini membuka kemungkinan untuk memproduksi neutron monokromatik dengan salah satu keadaan polarisasi, dengan cara berpindah dari suatu refleksi ke refleksi lainnya, tanpa menggunakan peralatan elektronik.

d. Spektroskopi Molekular

Keunggulan neutron adalah untuk meneliti spektrum molekular, karena tidak berlakunya kaidah seleksi seperti radiasi optik. Selain itu, karena hamburan neutron peka terhadap isotop, maka dengan menggantikan suatu unsur dengan isotopnya diperoleh informasi tambahan. Dengan beroperasi spektrometer detektor filter, maka telah diteliti rotasi terhalang dalam NH₄Cl dan NH₄Br [2]. Penelitian yang menarik ialah penentuan gerak librasi molekular air dalam Ba(ClO₃)₂.H₂O

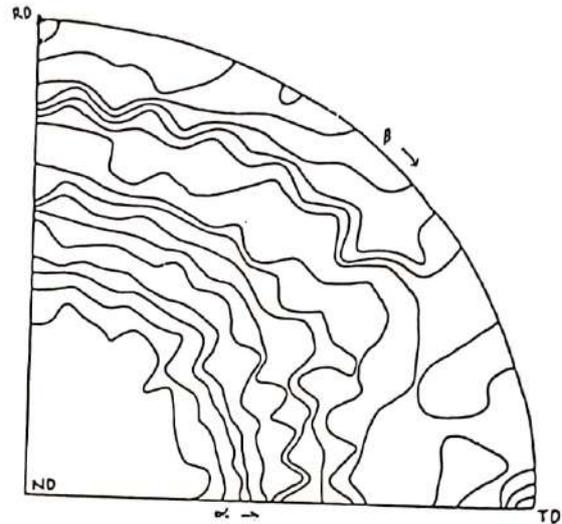
dan $BaCl_2 \cdot 2H_2O$ (35), yang akan diuraikan secara singkat di bawah ini.

Penelitian Gerak Librasi Molekul Air dalam $Ba(ClO_3)_2 \cdot H_2O$ dan $BaCl_2 \cdot 2H_2O$ [35]:

Telah diteliti gerak librasi molekul air dalam kristal molekular dengan hamburan inelastik pada suhu kamar dan 90K menggunakan spektrometer detektor filter. Karena $Ba(ClO_3)_2 \cdot H_2O$ mempunyai sebuah molekul air, maka diharapkan timbul tiga puncak yang berkorespondensi dengan gerak goyang (rocking), gerak pelintir (twisting) dan gerak melambai (waving). Hasil percobaan pada 90°K menunjukkan pada 463 cm^{-1} dan 396 cm^{-1} sesuai dengan pengukuran infra merah, dan berkorespondensi dengan gerak goyang, pelintir dan melambai. Gerak pelintir tidak dapat dipisahkan karena cuplikannya berupa serbuk, sehingga orientasi molekulnya acak terhadap vektor hamburan. Hal ini dapat dihindari jika digunakan cuplikan kristal tunggal. $BaCl_2 \cdot 2H_2O$ mempunyai dua molekul air yang berbeda secara kristalografis, sehingga diharapkan muncul enam puncak. Dalam percobaan ini hanya muncul empat puncak pada 674 cm^{-1} , 565 cm^{-1} , 475 cm^{-1} , dan 405 cm^{-1} . Karena cuplikannya berupa serbuk, maka gerak pelintir dari kedua molekul air tak dapat dipisahkan. Hasil pengukuran pada $BaCl_2 \cdot 2H_2O$ ini sesuai dengan pengukuran Spektrometer Waktu Terbang (TOF).

e. Penelitian Tekstur

Logam dan paduan logam merupakan bahan polikristal yang dibangun dari kristalit-kristalit yang berorientasi acak atau mempunyai kecenderungan orientasi ke arah tertentu. Orientasi kristalit di dalam bahan disebut tekstur. Sifat fisis dan mekanis suatu bahan sangat dipengaruhi oleh teksturnya. Tekstur dapat ditentukan dari gambar kutubnya yang diperoleh dari difraksi sinar-X atau neutron. Karena daya tembus neutron jauh lebih besar daripada sinar-X, maka pengukuran tekstur lebih baik dilakukan dengan neutron, terutama untuk bahan yang berukuran tebal. Tekstur suatu cuplikan dianalisis dari gambar kutubnya dengan bantuan gambar proyeksi stereografik standar dan hubungan antara bidang-bidang kristal. Sejak beroperasinya difraktometer tekstur, telah dilakukan penelitian tekstur dari kawat dan batang aluminium, tembaga, baja dan kuningan [36]. Juga telah dilakukan penentuan tekstur dari pelat aluminium [37] dan tembaga [38]. Analisis tekstur aluminium bentuk batang [39], tekstur aluminium dalam cuplikan Al-Pb [40] dan tekstur *Zircaloy-4* [41,42] telah pula ditentukan. Di bawah ini diuraikan penentuan tekstur dalam *Zircaloy-4*.



Gambar 11. Pola gambar kutub dari *Zircaloy-4* dengan lempeng bidang (1010). Tanda menyatakan intensitas maksimum

Penelitian Orientasi Kristalit dalam Zircaloy-4 [41, 42]

Zircaloy-4 banyak digunakan sebagai kelongsong bahan bakar nuklir, mempunyai struktur heksagonal kompak dengan $a = 3,232$ Angstrom dan $c = 5,147$ Angstrom. Bahan yang diteliti berupa pelat dengan tebal 6,25 mm. Supaya intensitas neutron terhambur tinggi, maka cuplikan dibuat berlapis-lapis membentuk kubus sisi 1,0 cm. Pola difraksinya ditentukan pada panjang gelombang 1,236 angstrom, kemudian detektor dipasang sudut 2θ dari puncak (0001). Posisi ini tetap dipertahankan selama pengukuran gambar kutub dilakukan, yaitu dengan memutar α dari 0 sampai 90° dengan langkah 5°. Setiap gerak diikuti dengan perputaran β dari 0 sampai 360°. Pencacahan dilakukan tahap demi tahap. Gambar kutub diperoleh dengan memplot sepanjang garis bujur (latitude) dan β sekeliling lingkaran latitude. Gambar kutub *Zircaloy-4* dapat dilihat dalam gambar 11. Teksturnya dinyatakan dengan orientasi ideal (hkl) $\langle uvw \rangle$, dan dengan bantuan proyeksi stereografis standar, orientasi idealnya ialah (0001) $\langle 1010 \rangle$. Ini berarti bahwa sebagian besar kristalitnya terorientasi pada bidang (0001) sejajar dengan bidang pengerolan, dan arah $\langle 1010 \rangle$ sejajar dengan arah pengerolan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Sejak beroperasinya reaktor Triga Mark II telah dimanfaatkan berkas neutron untuk penelitian zat mampat dengan teknik hamburan neutron. Untuk ini telah dibuat beberapa peralatan neutron. Selain untuk penelitian, selama ini fasilitas yang ada di PPTN telah digunakan dengan baik untuk melakukan tugas akhir S1, tesis S2, dan disertasi S3 para mahasiswa ITB dan Perguruan Tinggi lainnya. Hal ini sangat menunjang pengembangan staf di BATAN pada umumnya, karena setelah menamatkan kuliahnya para mahasiswa tersebut banyak yang tertarik untuk menjadi peneliti di BATAN.

Kesukaran utama yang dihadapi dalam melaksanakan penelitian berkas neutron ini ialah dalam penyediaan/pembuatan cuplikan, karena fasilitas untuk ini belum memadai. Juga sukarnya

memperoleh kepustakaan yang baru, yang merupakan kendala yang harus dapat ditanggulangi. Perangkat elektronik difraktometer, perlu diperbaharui dengan sistem *on-line*. Harapan di masa depan, semoga PPTN semakin banyak menampung para mahasiswa untuk menyelesaikan tugas akhir. Dan kegiatan penelitian agar dikoordinasikan, dan juga bekerja sama dengan unit-unit yang ada di BATAN sendiri serta Perguruan Tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada rekan-rekan dan para bekas mahasiswa yang telah bekerja sama mengembangkan teknik hamburan neutron di PPTN ini, baik yang kini bertugas di BATAN maupun yang telah meninggalkan BATAN.

PUSTAKA

1. MARSONGKOHADI, dkk., "Difraktometer Neutron PRAB", Seminar Hasil-Hasil Penelitian dalam Bidang Tenaga Atom, PRAB, Bandung, Februari 1970.
2. AMILLIUS, Z., dkk., "Pemasangan Spektrometer Detektor Filter-Penceraan dan Percobaan Pendahuluan", Simposium Fisika Nasional IV Yogyakarta, 1975.
3. HARDI SAMIJAYA, dkk., "Pembuatan Instrumentasi Pembantu Untuk Spektroskopi Neutron", Simposium Fisika Nasional IV, Yogyakarta, 1975.
4. KURNIADI SUMAAMIDJAJA, dkk., "Sistem Kendali Elektronik Untuk Spektrometer Neutron", Simposium Fisika Nasional VI, Bandung, 1978.
5. MARSONGKOHADI, dkk., "Pembuatan Difraktometer Neutron untuk Penelitian Magnetisme", Kolokium Teknologi Elemen Bakar Nuklir, Teknologi Reaktor dan Penggunaan Reaktor, Bandung, 1979.
6. MARSONGKOHADI, "Neutron Scattering Technique and the Magnetic Behaviour of Transition Metal Nitrides", Disertasi Doktor, Institut Teknologi Bandung, 1986.
7. BAMBANG H. PRANOWO, KURNIADI SUMAAMIDJAJA, EDI SANTOSO, "Pengontrolan dan Pengumpulan Data Difraktometer Neutron dengan Komputer", Seminar Teknologi Reaktor dan PLTN, Bandung 1986.
8. MUJAMILAH, "Otomatisasi Pengumpulan Data Difraktometer Tekstur", Laporan Tugas Akhir, Jurusan Fisika, ITB, 1988.
9. HENDRO, "Studi Sistem Antarmuka antara Difraktometer Neutron dengan IBM-PC", Tesis S-2, Jurusan Fisika, ITB, 1987.
10. KURNIADI SUMAAMIDJAJA, dkk., "Difraktometer Kembar", Simposium Fisika Nasional XI, Bandung 1987.
11. MARSONGKOHADI dan ANUNG KUSNOWO, "Kriostat Nitrogen Cair untuk Difraksi Neutron", Proceedings ITB, 9, 47, 1975.
12. MARSONGKOHADI, A. KRESHNA, N.M. AGUNG, "Pemakaian Resistor Karbon dan Dioda Sambungan P-N dalam Thermometry Suhu Rendah", Proceeding ITB, 9, 27, 1974.
13. DJAJUSMAN, dkk., "Pemanas Cuplikan Difraktometer Neutron", Majalah Batan Vol XVI, 29, 1983.
14. MARSONGKOHADI, J.E WAWORUNTU, MUDJITO, "Difraksi Neutron oleh Campuran Logam Fe-Cr", Seminar Pengukuran Radiasi dan Instrumentasi Nuklir, Bandung, Feb, 1973.

15. SUASMORO, "Difraksi Sinar x dan Neutron dari Nikel, Aluminium dan Tembaga", Laporan Tugas Akhir, Jurusan Fisika, ITB, 1979.
16. DJAJUSMAN, KURNIADI SUMAAMIDJAJA, ILIAS GINTING, "Pengukuran Parameter Kisi Cr_2O_3 dengan Difraksi Neutron", Majalah BATAN, XIII, 36, 1980.
17. ILIAS GINTING dan KURNIADI SUMAAMIDJAJA, "Pengukuran Parameter Rentang Panjang Kuningan Fasa-Beta", Telaah, VII, 18, 1984.
18. MARSONGKOHADI, "X-Ray and Neutron Diffraction Studies of MnO_2 Ores", Atom Indonesia, 3, 13, 1977.
19. TRI HARDI PRIYANTO, "Penentuan Distribusi Kekosongan dalam $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (Maghemite) dengan Difraksi Neutron", Laporan Tugas Akhir, Jurusan Fisika, ITB, 1987.
20. UDJIANTO, "Difraksi Neutron dan Pengamatan Hamburan Diffuse Logam Campuran 20 Mn - 80 Cu", Laporan Tugas Akhir, Jurusan Fisika, ITB, 1988.
21. MARSONGKOHADI, KURNIADI SUMAAMIDJAJA, Z. AMILLIUS, "Penelitian Struktur dan Ukuran Partikel Serbuk Dioksida Uranium dengan Difraksi Neutron", Proceedings Simposium Fisika Nasional VI, Bandung, 1978.
22. MARSONGKOHADI dan ZAENAL ABIDIN, "Difraksi Neutron dari Antiferomagnetik NiO", Laporan Internal Jurusan Fisika ITB, 1971.
23. A. ARSLAN, "Difraksi Neutron dari NiO", Laporan Tugas Akhir, Jurusan Fisika UNPAD, 1986.
24. A. ARSLAN, MARSONGKOHADI, KURNIADI SUMAAMIDJAJA, "Sifat Antiferomagnetik NiO", Proceedings, Seminar Teknologi Daur Bahan Bakar dan Keselamatan Nuklir, 337, 1987.
25. A. TAUFIK, "Difraksi Neutron oleh MnO", Laporan Tugas Akhir, Jurusan Fisika, UNPAD, 1986.
26. F.X. HANDOKO, "Difraksi Neutron pada NiFe_2O_4 ", Laporan Tugas Akhir, Jurusan Fisika, ITB, 1981.
27. M. QOMARUDIN, "Difraksi Neutron pada ZnFe_2O_4 ", Laporan Tugas Akhir, Jurusan Fisika, ITB, 1981.
28. MARSONGKOHADI, M. QOMARUDIN, F.X. HANDOKO, "Struktur dan Sifat Magnetik Ferit Seng, Ferit Nikel dan Ferit Tercampur $\text{Zn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($0 < x < 1$)", Kolokium Teknologi Elemen Bakar Nuklir, Teknologi Reaktor dan Penggunaan Reaktor, Bandung, 1982.
29. HIDAYAT BRAHIM, "Pembuatan Cuplikan dan Pengukuran Permeabilitas Magnetik Ferit Tercampur $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ", Laporan Tugas Akhir, Jurusan Fisika, ITB, 1981.
30. ANDI, "Simulasi Komputer Untuk Menentukan Parameter Oksigen dalam Ferit Spinel, Fe_3O_4 , ZnFe_2O_4 dan MgFe_2O_4 dengan Difraksi Neutron", Laporan Tugas Akhir, Jurusan ITB, 1989.
31. SLAMET, "Simulasi Komputer Untuk Menentukan Parameter Oksigen dalam Ferit Spinel, dengan Difraksi Sinar-X", Laporan Tugas Akhir, Jurusan Fisika ITB, 1989.
32. MARSONGKOHADI, dkk., "Pembuatan dan Karakterisasi Ferit Heksagonal $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ", Proceedings ITB, 19, 47, 1986.
33. N.S.SATYA MURTHY, et al., "Neutron Diffraction Studies of Transition Metal Nitrides", Pramana (India), 24, 311, 1985.
34. S.K. PARANJPE, et al., "International Conference on Neutron Scattering", Santa Fe, New Mexico, 1985.
35. MARSONGKOHADI, et al, "On the Possibility of Using Mn_4N as a Neutron Polarizer", Proceedings ITB, 17, 47, 1984.
36. MARSONGKOHADI, et al., "Studies of Librational Motions of Water Molecules in Crystal Hydrates by Neutron Scattering", IAEA Regional Seminar on the Utilization of Research Reactors, Bandung, 1976.
37. Z. AMILLIUS, ILIAS GINTING, KURNIADI SUMAAMIDJAJA, "Penentuan Tekstur kawat dan Batang dengan Difraksi Neutron", Kolokium Teknologi Elemen Bakar Nuklir, Teknologi Reaktor dan Penggunaan Reaktor, Bandung, 1980.

38. Z. AMILLIUS, ILIAS GINTING, KURNIADI SUMAAMIDJAJA, "Penentuan Tekstur Pelat Alumunium", Kolokium Teknologi Elemen Bakar Nuklir, Teknologi Reaktor dan Penggunaan Reaktor, Bandung, 1980.
39. SYAHRIL, "Analisis Kwantitatif Tekstur Pelat Tembaga dengan Difraksi Neutron, Laporan Tugas Akhir, Jurusan Fisika ITB, 1986.
40. GUNAWAN, "Analisis Tekstur Alumunium Bentuk Batang dengan Difraksi Neutron", Proceedings, Seminar Teknologi Reaktor dan Pusat Listrik Tenaga Nuklir, Bandung, 1986.
41. GUNAWAN, ILIAS GINTING, INAWATI TANTO, "Penentuan Tekstur Alumunium dalam Cuplikan Al-Pb dengan Difraksi Neutron", Simposium Fisika ke XI, Bandung, 1987.
42. FATCHATUL BAIYINAH, "Analisis Profil Rietveld untuk Cuplikan Mn_4N ", Laporan Tugas Akhir, Jurusan Fisika, ITB, 1985.