

**LAPORAN TAHUNAN  
HIBAH BERSAING**



JUDUL:

**RELATIVISTIK DEUTERON;  
ANALISA APLIKASI MEDIS DALAM TERAPI PION**

**Tahun ke 1 dari rencana 3 tahun**

**Ketua Tim Peneliti:  
R. Yosi Aprian Sari, M.Si / 0007047308**

**UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA  
Desember 2015**

## HALAMAN PENGESAHAN

Judul : Relativistik Deuteron; Analisa Aplikasi Medis Dalam Terapi Pion

**Peneliti/Pelaksana**

Nama Lengkap : R YOSI APRIAN SARI M.Si.  
Perguruan Tinggi : Universitas Negeri Yogyakarta  
NIDN : 0007047308  
Jabatan Fungsional : Lektor  
Program Studi : Pendidikan Fisika  
Nomor HP : 081578010933  
Alamat surel (e-mail) : ryosia@uny.ac.id

**Anggota (1)**

Nama Lengkap : DENNY DARMAWAN S.Si.,M.A.  
NIDN : 0002127901  
Perguruan Tinggi : Universitas Negeri Yogyakarta  
Institusi Mitra (jika ada) :  
Nama Institusi Mitra : -  
Alamat : -  
Penanggung Jawab : -  
Tahun Pelaksanaan : Tahun ke 1 dari rencana 3 tahun  
Biaya Tahun Berjalan : Rp 55.000.000,00  
Biaya Keseluruhan : Rp 200.950.000,00

Mengetahui,  
Dekan EMIPA UNY



(Prof. Dr. H. Hamono)  
NIP/NIK 196203291987021002

Yogyakarta, 5 - 11 - 2015  
Ketua,

(R YOSI APRIAN SARI M.Si.)  
NIP/NIK 197304072006041001

Menyetujui,  
Ketua LPPM UNY



(Prof. Dr. Anik Gufron, M.Pd)  
NIP/NIK 196211111988031001

# **RELATIVISTIK DEUTERON; ANALISA APLIKASI MEDIS DALAM TERAPI PION**

**R. Yosi Aprian Sari, Denny Darmawan  
Jurusan Pendidikan Fisika, FMIPA UNY**

## **RINGKASAN**

Deuteron merupakan hasil dari interaksi proton dan neutron yang terkait dengan karakteristik elektromagnetiknya. Telaah karakterisasi sifat-sifat elektromagnetik deuteron dari fungsi gelombang relativistik dalam aplikasinya dalam bidang medis berupa terapi pion, yaitu dengan interaksi pion dengan materi (bagian tubuh manusia). Adapun tujuan penelitian tahun I ini adalah 1. Menentukan model interaksi non-relativistik deuteron; 2. Menentukan model interaksi relativistik deuteron; 3. Menentukan jarak interaksi yang bersesuaian dengan pertukaran partikel; 4. Menentukan energi ikat dan sifat-sifat elektromagnetik deuteron;

Langkah-langkah yang dilaksanakan untuk memenuhi target di tahun I ini adalah berupa kajian teoretis bagi fungsi gelombang relativistik, modifikasi dan diskretisasi program yang telah dibuat yang diperlukan untuk membuat suatu algoritma yang sesuai dan siap diterjemahkan dalam bahasa pemrograman komputer. Selanjutnya mengimplementasikan suatu teknik pemrograman untuk mendapatkan nilai besaran elektromagnetik ditinjau dari fungsi gelombang relativistik yang digunakan dalam menganalisa terapi pion.

Hasil yang diperoleh pada tahun I ini telah diseminarkan di *Internasional Symposium; The Application of Nuclear Technology to Support National Sustainable Development: Health, Agriculture, Energy, Industry and Environment*; October 26-28, 2015 - Satya Wacana Christian University, Salatiga, Indonesia dengan judul “*Deuteron Relativistic in The One Pion Exchange Potential*” dan akan dipublikasikan jurnal nasional yaitu *Indonesian Journal of Applied Physics (IJAP) UNS* edisi bulan April 2016, Vol. 6 No. 1 dengan judul “*Electromagnetic Properties of Non-Relativistic Deuteron in Ground State*”.

*Kata-kata kunci : Relativistik Deuteron, Elektromagnetik, Terapi Pion*

## **PRAKATA**

Alhamdulillah, puji syukur Penulis panjatkan kepada Allah atas segala nikmat yang telah dikaruniakan-Nya, sehingga Penulis bisa menyelesaikan laporan kemajuan Hibah Bersaing Tahun I ini.

Penulis menyadari bahwa seluruh kegiatan penelitian ini tidak lepas dari bantuan banyak pihak. Untuk itu, penulis mengucapkan banyak terima-kasih kepada :

1. Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Riset, Teknologi dan perguruan Tinggi.
2. Rektor UNY, Ketua LPPM UNY, Dekan FMIPA UNY, Ketua Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA UNY beserta seluruh staf yang telah memberi ijin, kesempatan dan memfasilitasi penelitian ini.
3. Bapak Denny Darmawan, M.Sc selaku anggota peneliti yang bersedia membantu penelitan, serta rekan-rekan dosen, karyawan dan semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu atas semua bantuan, semangat dan dorongan yang telah diberikan.

Akhirnya Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih belum sempurna. Oleh karena itu, seluruh saran, kritik dan masukan yang bersifat membangun akan Penulis terima dengan senang hati.

Semoga penelitian ini bermanfaat bagi kita semua dalam menuju hidup yang lebih baik. Amin...

Yogyakarta, November 2015  
Ketua Peneliti,

R. Yosi Aprian Sari

## DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
RINGKASAN	iii
PRAKATA	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
BAB I. PENDAHULUAN	1
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	5
BAB III. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN	12
BAB IV. METODE PENELITIAN	13
BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN	15
BAB VI. RENCANA TAHAPAN BERIKUTNYA	16
BAB VII. KESIMPULAN DAN SARAN	17
DAFTAR PUSTAKA	18
LAMPIRAN	

## DAFTAR TABEL

<b>No</b>	<b>Judul Tabel</b>	<b>Halaman</b>
<b>1.</b>	Empat Interaksi Pokok	<b>3</b>

## DAFTAR LAMPIRAN

No	Jenis Lampiran		Hal
1.	Instrumen Penelitian		
a.	<i>Logbook</i>		
b.	<i>Source Code Program</i>		
2.	Personalisasi Tenaga Peneliti		
	Ketua	R. Yosi Aprian Sari, M.Si	
	Anggota	Denny Darmawan, M.Sc	
3.	Publikasi		
a.	<i>Internasional Symposium; The Application of Nuclear Technology to Support National Sustainable Development: Health, Agriculture, Energy, Industry and Environment; October 26-28, 2015 - Satya Wacana Christian University, Salatiga, Indonesia dengan judul "Deuteron Relativistic in The One Pion Exchange Potential"</i>		
b.	<i>Indonesian Journal of Applied Physics (IJAP) UNS edisi bulan April 2016, Vol. 6 No. 1 dengan judul "Electromagnetic Properties of Non-Relativistic Deuteron in Ground State"</i>		

## BAB I PENDAHULUAN

Kajian tentang *electromagnetism-deuteron*, hingga saat ini masih tetap menjadi perhatian para peneliti khususnya bidang fisika inti. Dalam sudut pandang pengembangan sains, hal ini memperlihatkan aspek fisika yang belum tuntas dijabarkan meskipun sudah mulai terbuka potensi aplikasinya. Beberapa fenomena fisika menarik deuteron sedikit diuraikan sebagai berikut. Hasil penelitian yang dilaporkan [**Cooke and Miller, (2002)**] menunjukkan adanya dinamika pion pada deuteron. Tim peneliti yang sama yaitu [**Cooke and Miller (2002)**] juga *mampu* menyelesaikan persamaan gelombang deuteron dan energi ikatnya. Selanjutnya [**Hanhart (2007)**] melakukan penyelidikan tentang reaksi pion pada sistem dua nukleon. Sedangkan [**Valderrama and Arriola, (2005)**] menganalisa keadaan terikat deuteron pada potensial OPEP. Perhitungan besaran-besaran statik dan dinamik deuteron telah menarik perhatian banyak peneliti pada beberapa tahun terakhir ini [**Korkin, (2005)**; **Banerjee, (1998)**; **Epelbaum, dkk, (2005)**]. Selain itu, [**Barbiellini, dkk (1989)**, **Forest (1999)** dan **Sviratcheva, dkk (2006)**] menganalisa sifat-sifat non lokal dari potensial interaksi. Adapun publikasi yang secara spesifik membahas efek elektromagnetika antara lain [**Dong (2009)** dan **Gilman and Gross (2002)**].

Penelitian yang diusulkan ini merupakan kelanjutan penelitian yang telah dilakukan oleh TPP sebelumnya yang telah dipublikasi, yaitu 1) bentuk interaksi proton dan neutron yang membentuk deuteron dalam potensial lokal [**R. Yosi Aprian Sari, (2011)**]; 2) momen elektromagnetik statik deuteron dalam potensial lokal [**R. Yosi Aprian Sari, dkk (2011)**], dan 3) dinamika pertukaran partikel pada deuteron dalam potensial lokal [**R. Yosi Aprian Sari, dkk (2012)**]. Bagian yang belum dikaji dari penelitian terdahulu berupa efek fungsi gelombang non-relativistik dan relativistik pada keelektromagnetikan deuteron.

Hal yang menjadi *keutamaan* pada usul penelitian ini adalah pengembangan model potensial interaksi kuat gaya inti (proton-neutron pada keadaan terikat). Penguasaan pemahaman berkenaan dengan hal ini akan membuka peluang pemanfaatan aplikasi di bidang kedokteran. Beberapa literatur yang telah disampaikan di muka masih sedikit peneliti diskusi tentang elektromagnetik deuteron. Pada usul penelitian ini,



elektromagnetik deuteron pada tinjauan model partikel dalam interaksi kuat gaya inti akan dikaji secara komprehensif. Tinjauan non-relativistik maupun relativistik menambah orisinalitas usul penelitian ini. Sehingga di akhir penelitian diharapkan dapat memberi kontribusi sumbangan pada cabang ilmu pengetahuan terutama fisika inti yang tertuang dalam naskah kerja / makalah ilmiah.

Gaya inti (atau gaya kuat) adalah gaya antara dua atau lebih nukleon. Gaya ini bertanggung jawab atas ikatan proton dan neutron menjadi penyusun inti atom. Gaya ini dapat dipahami sebagai pertukaran meson ringan virtual, seperti pion.

Kadang-kadang gaya inti disebut sebagai gaya kuat, dibandingkan dengan interaksi kuat lainnya yang saat ini dipahami sebagai akibat kromodinamika kuantum (*Quantum Chromodynamics*, atau biasa disingkat QCD). Peristilahan ini muncul pada dasawarsa 1970-an saat QCD sedang dikembangkan. Sebelum masa itu gaya kuat nuklir merujuk pada potensial internukleon. Setelah model quark diverifikasi, interaksi kuat diartikan sebagai QCD.

Pendekatan mikroskopis dalam mempelajari teori struktur inti, yaitu dengan menelaah dinamika kesatuan sistem nukleon penyusunnya tersebut sebagai akibat interaksi di antara mereka. Interaksi nukleon-nukleon dalam inti dapat berupa interaksi proton-proton, neutron-neutron maupun proton-neutron melalui suatu potensial interaksi dengan sistem pada keadaan terikat. Interaksi proton-neutron akan menghasilkan inti stabil yang paling sederhana yang disebut *deuteron*.

Deuteron merupakan inti yang paling sederhana setelah hidrogen, karena deuteron hanya memiliki satu keadaan terikat dan deuteron dihasilkan antara interaksi proton dan neutron dalam suatu potensial tertentu. Dalam interaksinya, proton dan neutron mengalami proses yang disebut *pertukaran meson* di antara mereka. Pertukaran meson diusulkan oleh Yukawa pada tahun 1935 yang dikenal sebagai *Teori Medan Meson*. Yukawa menyatakan bahwa terdapat partikel dengan parameter massa antara massa elektron dan massa nukleon yang bertanggung jawab atas adanya gaya inti. Partikel tersebut dikenal sebagai *pion*. Pion dapat bermuatan ( $\pi^+, \pi^-$ ) atau netral ( $\pi^0$ ), ketiganya membentuk triplet isospin dengan  $T = 1$ . Pion ini merupakan anggota dari kelompok partikel elementer berinteraksi kuat (hadron) yang mempunyai massa menengah dan secara kolektif disebut *meson*; pion adalah singkatan dari  $\pi$ -meson [Rho and Wilkinson, (1979)].

**Tabel 1.**  
**Empat Interaksi Pokok [Beiser, (1987)]**

Interaksi	Partikel Yang Dipengaruhi	Jangkauan	Pertukaran Partikel	Aturan Universum
Kuat	Quark Hadron	$\sim 10^{-15}$ m	Gluon Meson	Quark mengikat menjadi bentuk nukleon Nukleon mengikat menjadi bentuk atomik inti
Elektromagnetik	Partikel bermuatan	$\infty$	Foton	Penentuan struktur atom, molekul, zat padat dan zat cair; adalah faktor yang penting dalam jagat raya
Lemah	Quark dan Lepton	$\sim 10^{-17}$ m	Boson Madya	Transformasi menengah dari quark dan lepton; menolong dalam menentukan komposisi inti atom
Gravitasi	Semua	$\infty$	Graviton	Penemuan materi menjadi planet, bintang dan partikel

Menurut teori Yukawa, setiap nukleon terus-menerus memancarkan dan menyerap pion; transfer momentum yang menyertainya setara dengan aksi gaya. Gaya inti saling tolak pada jangkauan sangat pendek dan saling tarik pada jarak nukleon-nukleon yang agak jauh, karena jika tidak demikian, nukleon dalam inti akan menyatu, dan salah satu kekuatan teori meson untuk gaya seperti itu ialah kedua aspek tersebut tercakup. Potensial terjadinya proses pemancaran dan penyerapan pion tersebut adalah potensial OPEP,  $V_{\text{OPEP}}$ . [Gasiorowicz, (1974); Beiser, (1987); R. Yosi Aprian Sari, (2011)].

Interaksi inti antar penyusunnya merupakan gabungan interaksi kuat, interaksi elektromagnetik, dan interaksi lemah. Interaksi kuat penentu utama struktur, distribusi dan gerak nukleon dalam inti. Distribusi muatan, arus listrik dan momen magnet sistem nukleon akan menghasilkan medan listrik dan magnetik yang merupakan fungsi letak dan ikut mengatur struktur inti melalui interaksi elektromagnet. Distribusi muatan, arus dan momen magnet menimbulkan medan elektromagnet yang gayut ruang; medan listrik  $\propto 1/r^2$  timbul dari muatan, dikenal sebagai momen ke-nol atau monokutub; medan listrik  $\propto 1/r^3$  timbul dari momen pertama atau dwikutub; medan listrik  $\propto 1/r^4$  timbul dari momen kedua atau caturkutub, dan seterusnya. Setiap momen multikutub magnetik orde tinggi berpeluang untuk muncul pula kecuali momen monokutub, sebab medan momen monokutub ( $\propto 1/r^2$ ) tidak ada. Momen dwikutub magnet timbul dari arus listrik (orbital) dan spin (intrinsik). Momen multikutub terkait dengan simetri inti,

dan secara langsung dapat dikaitkan dengan momentum sudut maupun paritas inti [Greiner and Maruhn, (1996), R. Yosi Aprian Sari, dkk, (2011)].

Deuteron, tersusun atas sebuah proton dan sebuah neutron, yang merupakan inti yang stabil. Sebagai sebuah atom, deuteron disebut deuterium sebagai isotop hidrogen yang memiliki kelimpahan  $1,5 \times 10^{-4}$  dibandingkan dengan 0,99985 hidrogen biasa. Stabilitas itu luar biasa karena neutron bebas tidak stabil dan mengalami peluruhan beta dengan waktu paruh 10,3 menit. Energi ikat deuteron sebesar  $2,2\text{MeV}/c^2$  [R. Yosi Aprian Sari, dkk, (2012)].

Jika neutron dalam deuteron mengalami peluruhan membentuk proton, elektron dan antineutrino,  ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + \beta^- + \bar{\nu}$ , maka energi massa gabungan dari partikel-partikel tersebut berupa massa deuteron,

$$2(938,27 \text{ MeV}/c^2) + 0,511\text{MeV}/c^2 = 1877,05\text{MeV}/c^2$$

Massa deuteron sebesar  $1875,6\text{MeV}/c^2$ , berimplikasi bahwa energi di atas keadaan dasar deuteron menjadi tidak stabil dan meluruh. Neutron bebas menghasilkan energi sebesar  $0,78\text{MeV}/c^2$  dalam peluruhan beta, tetapi  $2,2\text{MeV}/c^2$  energi ikat deuteron mencegah terjadi peluruhan.

Kestabilan deuteron sangat penting dalam sejarah alam semesta. Dalam model *Big Bang* (ledakan besar) diduga bahwa dalam awal terbentuknya alam semesta ada sejumlah proton dan neutron karena energi yang tersedia jauh lebih tinggi daripada  $0,78\text{MeV}/c^2$  diperlukan untuk mengkonversi proton dan elektron menjadi neutron. Ketika suhu turun ke titik yang mana neutron tidak bisa lagi diproduksi dari proton, peluruhan neutron bebas mulai berkurang populasi mereka. Neutron-neutron yang berinteraksi dengan proton-proton membentuk deuteron yang berfungsi untuk menjaga agar tidak terjadi peluruhan lebih lanjut. Ini penting sekali untuk dipelajari karena jika neutron habis meluruh maka alam semesta sekarang ini tidak ada lagi.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

Untuk menyelidiki interaksi proton dan neutron di dalam potensial  $V$  melalui telaah sistem dua partikel, massa partikel deuteron ditampilkan sebagai massa tereduksi  $m^*$  pasangan massa proton dan massa neutron penyusun sistem sebesar  $m_p m_n / (m_p + m_n)$ . Penyelesaian persamaan sistem dua partikel memuat penyelesaian persamaan pusat massa yang bebas dan penyelesaian gerak relatif yang memenuhi persamaan Schrödinger dengan potensial antar nukleon,  $V = V(\vec{r})$ , dengan penampilan pers. (1) yang setara dengan persamaan partikel tunggal dengan parameter massa  $m^*$  sebagai parameter inersia.

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dr^2} + \frac{L(L+1)\hbar^2}{2m^* r^2} + V(r) \right] \chi(r) = E \chi(r) \quad (1)$$

Gerak yang terjadi dalam potensial interaksi  $V(\vec{r})$  yang untuk gaya sentral merupakan potensial bersimetri bola  $V(\vec{r})$  dalam ruang berdimensi tiga yang bergantung padar yang sama dengan besar vektor letak relatif  $\hat{\vec{r}}$  dua partikel, kesimetrian bola  $V$  ini menyebabkan observable  $\hat{\vec{L}}^2$  bernilai pasti untuk keadaan stasioner dengan energi pasti  $E$  yang merupakan swanilai operator hamilton  $\hat{H} = \hat{T} + \hat{V}$ . Gerak dalam potensial sentral  $V(\vec{r})$  memiliki sifat bahwa masing-masing komponen operator  $\hat{\vec{L}}$ , yaitu  $\hat{L}_{x,y,z}$  yang tak saling berkomutasi serta kuadratnya  $\hat{\vec{L}}^2$  berkomutasi dengan Hamiltonian sistem  $\hat{H}$ , akibatnya  $\hat{H}$  invarian terhadap rotasi, dan swanilai  $\hat{\vec{L}}^2$  serta salah satu dari komponen  $\hat{\vec{L}}$  misalnya  $\hat{L}_z$  dapat dihadirkan secara serentak dengan swanilai  $E$  dari  $\hat{H}$  [Tannoudji, Diu, Laloë, (1977)].

Interaksi nukleon-nukleon dapat menimbulkan gaya di antara mereka. Dalam atom, elektron terikat oleh potensial elektrostatik sentral yang ditimbulkan oleh proton-proton dalam inti dan antara sesama elektron. Ini berarti bahwa gaya yang dialami oleh elektron dapat dibagi menjadi dua bagian, sebagian disebabkan oleh inti dan bagian kedua timbul dari interaksi dengan elektron lain. Dalam inti, tidak ada sumber eksternal yang memberikan gaya pada nukleon tunggal sebagai hasil interaksi dengan satu partikel tunggal. Operator partikel tunggal dalam Hamiltonian inti berupa operator

energi kinetik saja yang terkait dengan gerak nukleon sebagai suatu interaksi partikel tunggal “efektif” dalam potensial interaksi inti dan dapat diambil dari nilai rata-rata interaksi antara sesama pasangan nukleon dalam inti [Wong, (1990)].

Pada interaksi nukleon-nukleon, ada tiga asumsi dasar yang harus dipenuhi dalam konsep interaksi nukleon-nukleon, yaitu [Ring dan Schuck, (1980)]:

- (i) Derajat kebebasan meson dinamik dapat diabaikan dan inti dapat dipandang sebagai sistem  $A$  nukleon dengan interaksi yang dapat disajikan oleh suatu potensial tertentu.
- (ii) Efek relativistik diabaikan.
- (iii) Timbul gaya-gaya di antara dua partikel.

Dalam mekanika kuantum, potensial dua partikel  $\hat{V}$  secara lengkap ditampilkan sebagai unsur matriks antara keadaan-keadaan sistem dua partikel yang disajikan oleh ket  $|\hat{\mathbf{r}}_1, s_1, t_1; \hat{\mathbf{r}}_2, s_2, t_2\rangle$  dengan  $s_i = \pm \frac{1}{2}$  dan  $t_i = \pm 1$  yang masing-masing merupakan observabel spin dan isospin partikel ke- $i$ . Unsur matriks tersebut berbentuk:

$$\langle \hat{\mathbf{r}}'_1, s'_1, t'_1, \hat{\mathbf{r}}'_2, s'_2, t'_2 | \hat{V} | \hat{\mathbf{r}}_1, s_1, t_1, \hat{\mathbf{r}}_2, s_2, t_2 \rangle \quad (2)$$

Ket keadaan dua partikel  $|\hat{\mathbf{r}}_1, s_1, t_1, \hat{\mathbf{r}}_2, s_2, t_2\rangle$  merupakan hasilkali fungsi gelombang koordinat letak ( $|\hat{\mathbf{r}}_1\rangle, |\hat{\mathbf{r}}_2\rangle$ ), ket spin ( $|s_1\rangle, |s_2\rangle$ ) dan isospin ( $|t_1\rangle, |t_2\rangle$ ). Operator spin partikel tunggal dapat disajikan sebagai bentuk kombinasi linear tiga matriks spin Pauli,  $\hat{\sigma}_1, \hat{\sigma}_2, \hat{\sigma}_3$  dan matriks satuan,  $\hat{\sigma}_0 = \hat{1}$ . Bentuk umum operator dua partikel  $\hat{V}$  adalah

$$\hat{V} = \sum_{i,k=0}^3 \hat{V}_{ik} \hat{\sigma}_i^{(1)} \hat{\sigma}_k^{(2)} \quad (3)$$

Fungsi  $\hat{V}_{ik}$  bergantung terhadap operator isospin  $\hat{t}^{(1)}$  dan  $\hat{t}^{(2)}$ . Selain bergantung terhadap isospin,  $\hat{V}_{ik}$  juga merupakan operator integral dalam ruang koordinat

$$\hat{V} |\hat{\mathbf{r}}_1 \hat{\mathbf{r}}_2\rangle = \int \hat{V}(\hat{\mathbf{r}}'_1 \hat{\mathbf{r}}'_2 | \hat{\mathbf{r}}_1 \hat{\mathbf{r}}_2) |\hat{\mathbf{r}}'_1 \hat{\mathbf{r}}'_2\rangle d^3 r'_1 d^3 r'_2. \quad (4)$$

Bila potensial  $\hat{V}(\hat{\mathbf{r}}'_1 \hat{\mathbf{r}}'_2 | \hat{\mathbf{r}}_1 \hat{\mathbf{r}}_2)$  mempunyai bentuk khusus

$$\hat{V}(\hat{\mathbf{r}}'_1 \hat{\mathbf{r}}'_2 | \hat{\mathbf{r}}_1 \hat{\mathbf{r}}_2) = \delta(\hat{\mathbf{r}}_1 - \hat{\mathbf{r}}'_1) \delta(\hat{\mathbf{r}}_2 - \hat{\mathbf{r}}'_2) \hat{V} |\hat{\mathbf{r}}_1 \hat{\mathbf{r}}_2\rangle, \quad (5)$$

Maka  $\hat{V}$  disebut *potensial lokal* dan

$$\hat{V} |\hat{\mathbf{r}}_1 \hat{\mathbf{r}}_2\rangle = \hat{V}(\hat{\mathbf{r}}_1 \hat{\mathbf{r}}_2) |\hat{\mathbf{r}}_1 \hat{\mathbf{r}}_2\rangle. \quad (6)$$

Dalam kasus ini, koefisien interaksi pada pers. (3) antara dua partikel hanya bergantung pada koordinat letak,  $\hat{\mathbf{r}}_1$  dan  $\hat{\mathbf{r}}_2$  (dan akhirnya juga pada spin dan isospin), tetapi tidak bergantung (misalnya) terhadap kecepatan partikel.

Secara umum potensial non-lokal berkorespondensi dengan ketergantungan terhadap kecepatan, dan dapat diekspansikan sebagai<sup>1</sup>

$$\begin{aligned} |\hat{\mathbf{r}}'_1, \hat{\mathbf{r}}'_2\rangle &= |\hat{\mathbf{r}}_1, \hat{\mathbf{r}}_2\rangle + (\hat{\mathbf{r}}'_1 - \hat{\mathbf{r}}_1) \frac{\partial}{\partial \hat{\mathbf{r}}_1} |\hat{\mathbf{r}}_1, \hat{\mathbf{r}}_2\rangle + (\hat{\mathbf{r}}'_2 - \hat{\mathbf{r}}_2) \frac{\partial}{\partial \hat{\mathbf{r}}_2} |\hat{\mathbf{r}}_1, \hat{\mathbf{r}}_2\rangle + \dots \\ &=: \exp \left[ (\hat{\mathbf{r}}'_1 - \hat{\mathbf{r}}_1) \frac{\partial}{\partial \hat{\mathbf{r}}_1} + (\hat{\mathbf{r}}'_2 - \hat{\mathbf{r}}_2) \frac{\partial}{\partial \hat{\mathbf{r}}_2} \right] : |\hat{\mathbf{r}}_1, \hat{\mathbf{r}}_2\rangle \end{aligned} \quad (7)$$

dan dari pers. (4) diperoleh

$$\begin{aligned} \hat{V} |\hat{\mathbf{r}}_1, \hat{\mathbf{r}}_2\rangle &= \int \hat{V}(\hat{\mathbf{r}}'_1, \hat{\mathbf{r}}'_2, \hat{\mathbf{r}}_1, \hat{\mathbf{r}}_2) \exp \left[ \frac{i}{\hbar} (\hat{\mathbf{r}}'_1 - \hat{\mathbf{r}}_1) \hat{\mathbf{p}}_1 + \frac{i}{\hbar} (\hat{\mathbf{r}}'_2 - \hat{\mathbf{r}}_2) \hat{\mathbf{p}}_2 \right] |\hat{\mathbf{r}}'_1, \hat{\mathbf{r}}'_2\rangle d^3 r'_1 d^3 r'_2 \\ &= \hat{V}(\hat{\mathbf{r}}_1, \hat{\mathbf{p}}_1, \hat{\mathbf{r}}_2, \hat{\mathbf{p}}_2) \end{aligned} \quad (8)$$

yang berarti potensial  $\hat{V} |\hat{\mathbf{r}}_1, \hat{\mathbf{r}}_2\rangle$  dapat digambarkan oleh pers. (3) dengan  $\hat{V}_{ik}$  sebagai operator dalam koordinat ruang dengan bentuk pers. (8), (untuk penyederhanaannya, ketergantungan isospin tak dicantumkan).

Dalam bentuk variabel-variabel bebas, potensial hanya dapat bergantung pada fungsi  $\hat{\sigma}_1, \hat{\sigma}_2, \hat{\tau}_1, \hat{\tau}_2$  selain  $\hat{\mathbf{r}}$  dan  $\hat{\mathbf{p}}$ . Operator isospin sistem dua partikel mempunyai bilangan yang terbatas yang tak bergantung secara linear dan dapat dibangun seperangkat operator nukleon tunggal yang memenuhi syarat simetri dari potensial inti. Pada momentum sudut orbital partikel tunggal  $\hat{\mathbf{L}}$  yang bukan variabel bebas dari hasilkali vektor  $\hat{\mathbf{r}}$  dan  $\hat{\mathbf{p}}$ . Potensial sistem dua partikel pada syarat tertentu harus mempunyai bentuk:

$$\begin{aligned} V(r; \hat{\sigma}_1, \hat{\sigma}_2, \hat{\tau}_1, \hat{\tau}_2) &= V_0(r) + V_\sigma(r)(\hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\sigma}_2) + V_\tau(r)(\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2) + V_{\sigma\tau}(r)(\hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\sigma}_2)(\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2) \\ &\quad + V_{LS}(r) (\hat{\mathbf{L}} \cdot \hat{\mathbf{S}}) + V_{LS\tau}(r) (\hat{\mathbf{L}} \cdot \hat{\mathbf{S}}) (\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2) \\ &\quad + V_T(r) S_{12} + V_{T\tau}(r) S_{12} (\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2) \\ &\quad + V_Q(r) Q_{12} + V_{Q\tau}(r) Q_{12} (\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2) \\ &\quad + V_{PP}(r) (\hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\mathbf{p}}) (\hat{\sigma}_2 \cdot \hat{\mathbf{p}}) \\ &\quad + V_{PP\tau}(r) (\hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\mathbf{p}}) (\hat{\sigma}_2 \cdot \hat{\mathbf{p}}) (\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2) \end{aligned} \quad (9)$$

Operator tensor<sup>2</sup>  $S_{12}$  mempunyai dua operator yang dapat dibangun dari operator

<sup>1</sup> : : berarti orde normal, yaitu derivatif  $\partial/\partial \hat{\mathbf{r}}_i$  tidak bertindak pada koordinat  $\hat{\mathbf{r}}_i$  dalam ekspansi eksponen.

<sup>2</sup> Operator tensor  $S_{12} = \frac{3}{r^2} (\hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\mathbf{r}}) (\hat{\sigma}_2 \cdot \hat{\mathbf{r}}) - \hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\sigma}_2$  dibentuk oleh hasilkali skalar operator rank kedua dalam ruang spin intrinsik.

nukleon tunggal, yaitu operator spin-orbit dua partikel,

$$\hat{\mathbf{L}} \cdot \hat{\mathbf{S}} = \frac{1}{2} (\hat{\mathbf{L}}_1 + \hat{\mathbf{L}}_2) \cdot (\hat{\sigma}_1 + \hat{\sigma}_2) \quad (10)$$

dan operator kuadrat spin-orbit,

$$Q_{12} = \frac{1}{2} \left\{ (\hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\mathbf{L}}) (\hat{\sigma}_2 \cdot \hat{\mathbf{L}}) + (\hat{\sigma}_2 \cdot \hat{\mathbf{L}}) (\hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\mathbf{L}}) \right\}. \quad (11)$$

Gayut radial dari dua belas bentuk yang diberikan dalam duabelas fungsi  $V_0(r)$ ,  $V_\sigma(r)$ , .... Untuk menentukan fungsi ini diperlukan informasi untuk membangkitkan dari keadaan simetri. Keduabelas bentuk pada pers. (9) dapat diuraikan dalam lima kelompok. Empat kelompok pertama [**Ring dan Schuck, (1980); Eisenberg dan Greiner, (1986)**],

$$V_{\text{sentral}} = V_0(r) + V_\sigma(r) (\hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\sigma}_2) + V_\tau(r) (\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2) + V_{\sigma\tau}(r) (\hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\sigma}_2) (\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2) \quad (12)$$

adalah bentuk *gaya sentral* ketika rank tensorial dari bagian ruang (*spatial*) semua keempat operator adalah nol. Bentuk pertama  $V_0(r)$  hanya gayut pada jarak radial  $r$  dan oleh karena itu invarian rotasi terhadap sistem koordinat. Gayut ruang dari bentuk kedua juga gayut pada  $r$ , tetapi berbeda dari bentuk sebelumnya yang gayut terhadap spin intrinsik dan operator  $\hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\sigma}_2$ .

Untuk sistem yang mengandung  $A$  nukleon, operator isospin merupakan jumlah dari nukleon-nukleon tunggalnya yang melakukan tindakan,

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^A \hat{\tau}_i. \quad (13)$$

Untuk sistem dua nukleon, operator isospinnya adalah

$$\hat{\mathbf{T}} = \frac{1}{2} (\hat{\tau}_1 + \hat{\tau}_2). \quad (14)$$

Ketika gaya inti dari dua partikel merupakan besaran skalar dalam ruang isospin dan dapat dibangkitkan dengan menggunakan operator  $\hat{\mathbf{1}}$  dan  $\hat{\tau}$  yang melakukan tindakan pada setiap salah satu dari dua nukleon. Operator  $\hat{\mathbf{T}}$  merupakan operator partikel tunggal ketika beroperasi pada nukleon-nukleon secara berturut-turut yang merupakan vektor dalam ruang isospin. Untuk membangun dua partikel dengan menggunakan operator isoskalar  $\hat{\mathbf{T}}$  untuk memperoleh hasil kali skalar  $\hat{\mathbf{T}}$  dengan dirinya

$$\hat{\mathbf{T}}^2 = \hat{\mathbf{T}} \cdot \hat{\mathbf{T}} = \frac{1}{4} (\hat{\tau}_1^2 + \hat{\tau}_2^2 + 2\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2). \quad (15)$$

Dua bentuk pertama pada bagian kanan merupakan operator partikel tunggal yang tidak dapat lenyap ketika hanya ada satu nukleon. Bentuk ketiga,  $(\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2)$ , merupakan

operator dua partikel yang dapat lenyap kecuali jika partikel tersebut melakukan tindakan pada keadaan dengan kedua nukleon 1 dan 2. Operator  $\hat{T}^2$  mempunyai keadaan rank campuran partikel satu dan dua. Hanya operator dua partikel dalam ruang isospin adalah operator satuan dan  $(\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2)$ ; semua operator dua partikel lainnya dapat diungkapkan sebagai kombinasi linear dua operator.

Dari pers. (15) diperoleh relasi,

$$\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2 = 2\hat{T}^2 - \frac{1}{2}\hat{\tau}_1^2 - \frac{1}{2}\hat{\tau}_2^2.$$

Untuk partikel tunggal (isospin  $\frac{1}{2}$ ), nilai harap  $\hat{\tau}^2$  adalah 3. Nilai harap  $\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2$  dalam ruang dua nukleon dengan isospin total  $\hat{T}$  adalah

$$\langle \hat{T} | \hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2 | \hat{T} \rangle = \begin{cases} -3 & \text{untuk } T = 0 \\ 1 & \text{untuk } T = 1 \end{cases} \quad (16)$$

Dari hasil ini dapat dilihat bahwa operator  $\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2$  dapat untuk membedakan keadaan dua nukleon dengan isospin  $T = 0$  dari  $T = 1$ , lainnya halnya dengan operator identitas yang mempunyai nilai harap yang keduanya sama pada keadaan isospin  $T = 0$  dan  $T = 1$ . Sifat-sifat ini dapat digunakan untuk mengungkapkan kebergantungan isospin dari gaya inti.

Seperti pers. (16), diperoleh

$$\langle \hat{S} | \hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\sigma}_2 | \hat{S} \rangle = \begin{cases} -3 & \text{untuk } S = 0 \\ 1 & \text{untuk } S = 1 \end{cases} \quad (17)$$

untuk dua nukleon dengan  $\hat{S}$  adalah spin intrinsik total. Operator  $\hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\sigma}_2$  terbedakan dari pasangan nukleon dalam keadaan triplet ( $S = 1$ ) dari pasangan dalam keadaan singlet ( $S = 0$ ), dengan cara yang sama seperti operator  $\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2$  dalam pemisahan pasangan nukleon isovektor dari pasangan isoskalar. Isospin memiliki dua operator skalar yang tidak gayut secara linear, operator identitas dan operator  $\hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\sigma}_2$  yang melakukan tindakan dalam ruang spin intrinsik dua nukleon. Hasil kali dua operator ini dengan operator yang tidak gayut secara linear dalam ruang isospin diberikan empat bentuk pemisahan dalam gaya sentral. Dua bentuk pertama dari pers. (12) tak bergantung isospin, tetapi bentuk ketiga dan keempat bergantung isospin dan operator  $\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2$ . Dengan cara yang sama, bentuk pertama dan ketiga tak bergantung pada spin intrinsik. Ketika semua bentuk adalah skalar dalam spin intrinsik dan sehingga dalam momentum sudut orbital, gaya sentral berkomutasi terhadap  $\hat{S}^2, \hat{L}^2$ , dan  $\hat{J}^2$

Bentuk lain dalam pers. (9) tidak dapat mempertahankan spin intrinsik total dan



momentum sudut orbital total sistem dua nukleon. Dalam keberadaannya, sistem dua nukleon hanya invarian dalam ruang yang dikombinasikan  $L$  dan  $S$  ditandai sebagai  $J$ . Kebergantungan dari gaya inti pada operator spin orbit dua partikel diungkapkan dalam bentuk kelima dan keenam,

$$V_{\text{spin-orbit}} = V_{LS}(r) (\hat{\mathbf{L}} \cdot \hat{\mathbf{S}}) + V_{LS\tau}(r) (\hat{\mathbf{L}} \cdot \hat{\mathbf{S}}) (\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2) \quad (18)$$

Operator spin-orbit dua partikel tidak dapat menghubungkan dua keadaan dengan momentum sudut orbital yang berbeda,

$$\langle \hat{L}\hat{S} | \hat{\mathbf{L}} \cdot \hat{\mathbf{S}} | \hat{L}'\hat{S}' \rangle = 0 \quad \text{untuk } \hat{L}' \neq L$$

Dari kombinasi tersebut, ada dua pengertian. Pertama, dari syarat kopling (*coupled*) momentum sudut, elemen matriks  $\langle \hat{L}\hat{S} | \hat{\mathbf{L}} \cdot \hat{\mathbf{S}} | \hat{L}'\hat{S}' \rangle$  lenyap jika  $|\hat{L}' - \hat{L}| > 1$ , ketika operator  $\hat{\mathbf{L}}$  hanya membawa satu satuan momentum sudut orbital. Kedua, paritas dari bagian orbital dari fungsi gelombang dengan momentum sudut  $L$  adalah  $(-1)^L$ . Di bawah pembalikan ruang, operator  $\hat{\mathbf{L}}$  dan  $\hat{\mathbf{S}}$  juga tidak berubah tanda. Elemen matriks  $\langle \hat{L}\hat{S} | \hat{\mathbf{L}} \cdot \hat{\mathbf{S}} | \hat{L}'\hat{S}' \rangle$ , tandanya berubah jika  $L' = L \pm 1$  dan harus lenyap. Sebagai hasilnya, bentuk spin-orbit tidak nol hanya di antara keadaan-keadaan momentum sudut orbital yang sama. Bentuk pasangan ketujuh dan kedelapan dalam pers. (9) merupakan bentuk gaya tensor dengan

$$S_{12} = \frac{3}{r^2} (\hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\mathbf{r}})(\hat{\sigma}_2 \cdot \hat{\mathbf{r}}) - \hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\sigma}_2.$$

Bentuk spin-orbit kuadrat,  $V_Q(r)Q_{12}$  dan  $V_{Q\tau}(r)Q_{12}(\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2)$ , gayut momentum dalam potensial. Dua bentuk terakhir, yaitu  $V_{PP}(r)(\hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\mathbf{p}})(\hat{\sigma}_2 \cdot \hat{\mathbf{p}})$  dan  $V_{PP\tau}(r)(\hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\mathbf{p}})(\hat{\sigma}_2 \cdot \hat{\mathbf{p}})(\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2)$  merupakan hamburan elastis yang dapat diungkapkan sebagai kombinasi linear dengan bentuk lainnya. Kontribusi ini tidak dapat ditentukan dengan menggunakan hamburan elastis, yang mana sebagian besar informasi interaksi nukleon-nukleon diperoleh.

Oleh karena simetri, keadaan dasar deuteron memiliki nilai spin instrinsik total  $S = 1$  dan isospin total  $T = 0$ . Nilai momentum sudut total yang memenuhi syarat tersebut adalah  $L = 0$  dan  $L = 2$  terkait terhadap fungsi gelombang deuteron. Dalam notasi spektroskopi, keadaan  $L = 0, S = 1$  dilambangkan sebagai  ${}^3S_1$  (keadaan- $S$  triplet) dan  $L = 2, S = 1$  sebagai  ${}^3D_1$  (keadaan- $D$  triplet). Keterkopelan keadaan ini

ditunjukkan pada persamaan (20), keterkopelan pada interaksi proton-neutron ini diakibatkan oleh adanya dua nilai momentum sudut  $L$ , yaitu  $L = 0$  dan  $L = 2$ . Terdapat campuran keadaan  ${}^3S_1 - {}^3D_1$  pada keadaan terikat deuteron, muncul beberapa besaran fisis antara lain momen dwikutub magnet,  $\mu_d$ , dan momen caturkutub listrik,  $Q_d$  [R. Yosi Aprian Sari, dkk, (2011)].

*Gayut radial* dari fungsi  $V$  tidak dapat dipaksakan dari prinsip invarian. Yukawa mengusulkan akan adanya gaya inti dengan menggunakan teori medan meson. Pengaruh meson oleh setiap dari pertukaran salah satu atau beberapa meson, yaitu pertukaran satu atau lebih meson. Bentuk yang paling sederhana adalah potensial pertukaran satu-pion (OPEP) yang mempunyai gayut radial dari potensial Yukawa

$$V_Y(r) = \frac{e^{-\mu r}}{\mu r} \quad (19)$$

dengan  $1/\mu = \hbar/m_\pi c$  yang merupakan panjang gelombang Compton-pion. Bentuk asimtotik ditentukan dengan sifat-sifat pion dan menggandeng dengan kuat medan nukleon,  $g^2/\hbar c \cong 0,081$ :

$$V_{\text{OPEP}} = \frac{g^2}{3\hbar c} m_\pi c^2 \frac{e^{-\mu r}}{\mu r} (\hat{\tau}_1 \cdot \hat{\tau}_2) \left[ (\hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\sigma}_2) + \left( 1 + 3 \frac{1}{\mu r} + 3 \left( \frac{1}{\mu r} \right)^2 \right) S_{12} \right]. \quad (20)$$

Dari analisa pergeseran fase hamburan nukleon-nukleon menunjukkan bahwa potensial-OPEP dapat menghasilkan pergeseran fase pada bilangan momentum sudut orbital yang besar,  $L \geq 6$  dengan jarak gaya inti ( $r \geq 2$  fm), dengan demikian, dapat dianggap bahwa potensial OPEP melukiskan gaya inti pada jarak yang cukup jauh. Untuk jarak yang lebih dekat lagi (menengah) dapat terjadi pertukaran dua pion dan pertukaran meson- $\rho$  dan meson- $\omega$ . Potensial OPEP mengandung kombinasi dari beberapa parameter, antara lain parameter sentral, tensor, spin-orbit dan lain sebagainya. Penelitian ini merupakan penelitian lanjutan yang telah dilakukan, baik didanai dari DPPM (Hibah Pekerti tahun 2010) maupun penelitian yang didanai dari DIPA Universitas (dapat dilihat di daftar pustaka di bagian belakang proposal ini). Pada penelitian sebelumnya, **interaksi proton dan neutron** dalam potensial tertentu telah dikaji, baik berupa analisis model interaksi maupun algoritma yang berkaitan model interaksi proton dan neutron.

### BAB 3

#### TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

Pada usul penelitian ini **tujuan jangka panjang** yang dicanangkan adalah eksplorasi komprehensif karakteristik deuteron dibawah pengaruh potensial OPEP dan mengembangkan potensi aplikasi terutama di bidang medis. Sedangkan **tujuan jangka pendek** dari penelitian ini adalah mengetahui sifat-sifat elektromagnetik deuteron dari fungsi gelombang non-relativistik dan relativistik dalam potensial OPEP. Sedangkan **lingkup** penelitian ini adalah interaksi proton-neutron pada keadaan terikat potensial interaksi OPEP (*One Pion Exchange Potential* / potensial pertukaran satu-pion).

**Manfaat** yang dapat disumbangkan dari hasil penelitian ini meliputi dua hal. *Pertama* dalam **bidang astrofisika**, karena diduga deuteron berperan menjaga agar neutron tidak meluruh secara terus-menerus, karena neutron dan proton merupakan unsur yang membentuk alam semesta. *Kedua* dalam **bidang kedokteran**, gas deuteron dipergunakan untuk mengukur dosimetri dalam medan neutron dalam radioterapi. Dari kedua manfaat ini, maka penguasaan pengetahuan mendalam tentang sifat-sifat fisis terutama sifat elektromagnetik deuteron sangat dibutuhkan.

## BAB 4

### METODE PENELITIAN

Secara garis besar, aktivitas penelitian ini dilakukan dengan **dua tahapan** yaitu (i) *formulasi metode komputasi* dan (ii) *penuangan numerik dalam bahasa pemrograman komputasi*. Pada tahapan formulasi metode komputasi, aktifitas penelitian diawali dengan penentuan syarat batas berlakunya potensial OPEP. Kemudian dilakukan analisis sifat-sifat elektromagnetika deuteron ditinjau dari fungsi gelombang non-relativistik. Langkah berikutnya penuangan metode komputasi numerik dalam program komputer untuk potensial OPEP. Sebelum dilakukan perhitungan secara komputerisasi, metode komputasi numerik diuji-cobakan ke-stabilan program terhadap syarat batas-syarat batas yang dimasukkan. Hal ini penting dilakukan agar hasil nilai perhitungan secara komputer bukan merupakan sekumpulan data tanpa makna fisis. Selain itu, prosedur ini juga menjadi *klarifikasi syarat batas* berlakunya parameter fisis yang telah dituangkan dalam numerik.

Interaksi proton dan neutron dalam suatu potensial yang dikenal sebagai potensial OPEP,  $V_{\text{OPEP}}$ , seperti pada persamaan (16) mengandung bagian gaya sentral,  $V_C(r)$  dan bagian gaya tensor,  $V_T(r)S_{12}$ ,

$$V(r) = V_C(r) + V_T(r)S_{12} \quad (17)$$

Dengan penjabaran mekanika kuantum, maka diperoleh persamaan diferensial terkopel untuk deuteron diturunkan dari pencampuran keadaan  ${}^3S_1$  dan  ${}^3D_1$  yang masing-masing terkait dengan nilai momentum nilai  $L = 0$  dan  $L = 2$ . Dua keadaan ini diinisiasikan masing-masing sebagai fungsi gelombang  $u(r)$  dan  $w(r)$ .

Adapun syarat normalisasi keadaan dasar deuteron  ${}^3S_1$  dan  ${}^3D_1$  adalah

$$\int_0^\infty [u^2(r) + w^2(r)]dr = 1. \quad (21)$$

Dari telaah teoretis interaksi proton dan neutron yang terikat akibat suatu potensial tak sentral  $V(\vec{r})$  yang menghasilkan keadaan terikat suatu inti yang dikenal sebagai *deuteron*, dan maka akan diperoleh informasi interaksi yang terkait.

Persamaan diferensial terkopel untuk fungsi gelombang radial  $u(r)$  dan  $w(r)$  deuteron tidak dapat diselesaikan secara analitik, dan hanya dapat diselesaikan melalui komputasi numerik, yaitu dengan metode Masalah Nilai Batas (MNB) lewat Metode

Selisih Hingga (MSH), dengan terlebih dahulu mengubah persamaan differensial menjadi persamaan aljabar, dalam sistem persamaan swanilai yang linear yang berlaku dalam interval  $a \leq r \leq b$  dengan syarat batas tertentu.

Tahapan selanjutnya adalah evaluasi pengaruh efek relativistik pada elektromagnetik deuteron. Secara umum, prosedur sama dengan tahapan sebelumnya, namun hanya dengan penyesuaian syarat batas.

### **Target/Indikator keberhasilan**

Hasil kerja yang diharapkan dapat diperoleh dari penelitian ini meliputi :

1. Diperoleh algoritma hasil analisis permasalahan, termasuk penjabaran rumus dan diskretisasi bagi semua persamaan diferensial, ungkapan integral serta fungsional.
2. *Source code* dan algoritma numerik yang terkait dengan pemrograman paralel.
3. Keluaran program (dengan teknik pemrograman paralel) yang berupa komputasi numerik dengan penyajian berupa file data dan grafik sesuai dengan parameter fisis yang diberikan.

Indikator keberhasilan dari penelitian ini yang tertuang pada pernyataan di atas secara fisik akan menghasilkan *sekuen* data eksperimen ***kredibel*** sehingga dapat diwujudkan berupa publikasi ilmiah pada seminar internasional dan seminar nasional atau jurnal nasional pada setiap akhir tahun penelitian.

## BAB 5

### HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Secara teori, interaksi dua nukleon dalam bentuk interaksi proton dan neutron memiliki satu keadaan terikat yang terikat pada suatu potensial tertentu yang disebut deuteron. Fungsi gelombang yang digunakan dalam telaah ini adalah fungsi gelombang relativistik. Sebagai hasilnya, deuteron memiliki keadaan campuran yaitu momentum sudut  $L$  pada  $L = 0$  dan  $L = 2$  yang terkait pada keadaan fungsi gelombang  $u(r)$  dan  $w(r)$ . Dalam notasi spektroskopi keadaan  $L = 0$  dituliskan  ${}^3S_1$  dan pada  $L = 2$  dituliskan  ${}^3D_1$ .
2. Dari hasil perhitungan, pada jarak interaksi yang cukup pendek ( $r_c = 0,4$  fm) terdapat dinding potensial yang mana tidak mungkin menemukan deuteron pada interval ini ( $0 \leq r \leq r_c$ ) fm. Kemudian pada jarak menengah ( $1 \leq r \leq 2$ ) fm, terdapat pertukaran meson skalar ( $\pi, \rho, \omega, \sigma$ ), dan pada jarak yang cukup jauh ( $r > 2$  fm) terdapat pertukaran pion tunggal. Adapun energi ikat deuteron adalah  $-2,2427356$  MeV.

## **BAB 6**

### **RENCANA TAHAPAN BERIKUTNYA**

Adapun rancangan penelitian tahun ke dua ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis model interaksi proton-neutron yang menghasilkan pertukaran partikel meson;
2. Menganalisis sifat-sifat observabel  $\pi$ -meson atau pion dalam deuteron, dan
3. Menganalisa interaksi radiasi (pion) dalam materi (tubuh manusia);

Untuk aplikasi medisnya, diharapkan pada tahun ke dua ini dapat:

1. Mengkaji bagian teoretis proses tumbukan partikel dengan materi.
2. Mengkaji aspek medis dari proses tumbukan partikel dan materi (kulit dan bagian dalam tubuh manusia).
3. Membuat model (simulasi) sederhana proses tumbukan partikel dan materi (kulit dan bagian dalam tubuh manusia).

Sedangkan rancangan penelitian pada tahun ke tiga difokuskan pada:

1. Kajian matematis yang didasari dari analisa fisis dan data medis;
2. Merancang program komputasi berkaitan interaksi radiasi (partikel pion) dengan materi (tubuh manusia);
3. Perhitungan / simulasi dosis serapan yang berasal dari pion bermuatan;

## **BAB 7**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **A. KESIMPULAN**

Kesimpulan dari penelitian ini ada 2 bagian, yaitu

1. Secara substansi, target pada tahun I berupa kajian teoretis dan perolehan data secara komputasi untuk fungsi gelombang relativistik telah diperoleh, baik bentuk fungsi gelombangnya yang merupakan keadaan terkopel, maupun nilai momen elektromagnetiknya yang mana nilai yang diperoleh tidak jauh berbeda dari perolehan secara teoretis.
2. Publikasi ilmiah penelitian Hibah Bersaing di tahun pertama ini sudah sesuai dari target yang diharapkan.

#### **B. SARAN**

1. Permasalahan aplikasi fisika nuklir merupakan kajian yang sangat mendalam, sehingga dibutuhkan kajian teoretis dan dibantu peralatan simulasi (komputer) yang sangat memadai.
2. Aplikasi medis dari teori nuklir membutuhkan peralatan eksperimen yang sangat canggih, salah satunya adalah dibutuhkan akselerator (pemercepat) partikel sehingga memiliki kecepatan mendekati kecepatan cahaya,  $v \approx c$ .



## DAFTAR PUSTAKA

- Banerjee, M. K. (1998).** Relativity Damps OPEP in Nuclear Matter. *Acta Phys. Polon.*B29 2509-2518
- Barbiellili, B. and T. Jarlborg. (1989).** A Simple Approach Towards Non Local Potentials: Theory and Application. *J. Phys. Condens. Matter*1 8865-8876
- Beiser, A, (1987),** *Concept of Modern Physics*, McGraw Hill Inc., Singapore
- Cooke, J. R. and G. A. Miller. (2002).** Deuteron binding energies and form factors from light front field theory. *Phys.Rev. C66 (2002) 034002*
- Cooke, J. R. and G. A. Miller.(2002).** Pion-only, chiral light-front model of the deuteron.*Phys.Rev. C65 067001*
- Dong Y. B.** (2009) Estimate of the two-photon exchange effect on deuteron electromagnetic form factors, *Phys.Rev.C80:025208,2009*
- Eisenberg, J.M., and W. Greiner, (1986),** *Nuclear Theory; Microscopic Theory of The Nucleus*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, Netherlands.
- Epelbaum, E., W. Glöckle, Ulf-G. Meißner,(2005),** The two–nucleon system at next-to-next-to-next-to-leading order, *Phys. Rev. A747, 362-464*
- Forest, J.L., (2000),** Effects of Nonlocal One-Pion-Exchange Potential in Deuteron, *Phys. Rev C61, 034007*
- Gasiorowicz, (2003),** *Quantum Physics* 3<sup>rd</sup>ed, John Wiley and Sons, Inc., New York, USA.
- Gilman, R. and F. Gross(2002)** Electromagnetic structure of the deuteron *J.Phys.G28:R37-R116,2002*
- Greiner, W. and J. A. Maruhn. (1996).** *Nuclear Models*. Springer: Heidelberg
- Garcon A, and J. W. Van Orden, (2001),** The Deuteron: structure and form factor, *Adv.Nucl.Phys. 26 (2001) 293*
- Gilman, R and F. Gross, (2002),** Electromagnetic Structure of the deuteron, *J.Phys.G28:R37-R116,2002*
- Hanhart, C., (2007),** Pion Reactions on Two-Nucleon Systems.*arXiv:nucl-th/0703028v1*
- Korkin, R. V. (2005).** P and T odd effects in deuteron in the Reid potential.<http://arxiv.org/abs/nucl-th/0504078v1>
- R. Yosi Aprian Sari, (2011)** “Sistem Dua Nukleon; Deuteron sebagai Sistem Terikat (p, n) pada Potensial Lokal” *Jurnal Media Fisika, Vol 10 / No 2 / Mei 2011, ISSN: 1412-5676.*
- R. Yosi Aprian Sari, Supardi, Agung BSU, Arief Hermanto (2011)** Momen Elektromagnetik Statik Deuteron Pada Dinamika Pertukaran Partikel Dalam Potensial Lokal Reid, *Prosiding Seminar Nasional Ke-17 TKPFN Yogyakarta, 01 Oktober 2011, <http://www.batan.go.id/ptrkn/file/tkpf17/09.pdf>*
- R. Yosi Aprian Sari, Supardi. Agung BSU, Arief Hermanto (2012)** “Dinamika Pertukaran Partikel Pada Interaksi Nukleon-Nukleon dalam Potensial Lokal” *Journal Indonesian Journal of Applied Physics (IJAP) Vol 02 / No 1 / April 2012, ISSN: 2089-0133, <http://ijap.mipa.uns.ac.id>.*
- Rho, M., and D. Wilkinson,(1979),** *Mesons in Nuclei*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, Netherlands.
- Ring, P., and P. Schuck, (1980),** *The Nuclear Many-Body Problem*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany.

- Tannoudji, C.C., B. Diu, F. Laloë** (1977), *Quantum Mechanics I and II* 2nd ed.  
Hermann and John Wiley and Sons, Inc. Paris, France
- Sviratcheva, K. D, J. P. Draayer, and J. P. Vary.** (2006). Realistic Two-  
body Interactions in Many-nucleon Systems: Correlated Motion beyond Single-  
particle Behavior. *SLAC-PUB-11903 June 2006*
- Valderraman, M. P. and E. R. Arriola.**(2005). Renormalization of the Deuteron with  
One Pion Exchange. *Phys.Rev. C72:054002*
- Wong, S.S.M.,** (1990). *Introductory Nuclear Physics*, Prentice Hall: New Jersey