ISSN : 2527 – 5917, Vol.4 No 1.
SEMINAR NASIONAL PENDIDIKAN FISIKA 2019
"Integrasi Pendidikan, Sains, dan Teknologi dalam Mengembangkan Budaya Ilmiah di Era Revolusi Industri 4.0 "
17 NOVEMBER 2019

KETIDAKPASTIAN MOMENTUM ATOM DEUTERIUM ($^{2}_{1}H$) MENGGUNAKAN PENDEKATAN KETIDAKPASTIAN HEISENBERG PADA BILANGAN KUANTUM n ≤ 3

Bagus Hadi Saputra

Program Studi Pendidikan Fisika, FKIP, UNIVERSITAS JEMBER

bagossugabbagos@gmail.com

Bambang Supriadi

Program Studi Pendidikan Fisika, FKIP, UNIVERSITAS JEMBER

bambangsscmsc@gmail.com

Sri Handono Budi Prastowo

Program Studi Pendidikan Fisika, FKIP, UNIVERSITAS JEMBER

Srihandono947@gmail.com

ABSTRAK

Deuterium merupakan salah satu isotop atom hidrogen yang memiliki sifat kuantum mirip dengan atom hidrogen dengan susunan sederhana, sehingga dalam penyelesaiannya dapat diselesaikan dengan persamaan Schrodinger dalam koordinat bola. Kedudukan elektron dalam atom tidak dapat ditentukan dengan pasti, yang dapat ditentukan adalah probabilitas menemukan elektron sebagai fungsi jarak dari inti atom. Probabilitas menemukan elektron didalam atom dapat diketahui berdasarkan fungsi gelombang radialnya. Penelitian ini bertujuan menentukan ketidakpastian momentum dengan pendekatan ketidakpastian Heisenberg atom deuterium pada bilangan kuantum (n ≤ 3). Jenis penelitian ini adalah penelitian non eksperimen berupa pengembangan teori yang sudah ada. Hasil penelitian berupa (1) simulasi distribusi probabilitas radial yang memberikan informasi keberadaan elektron dalam atom deuterium, serta menunjukkan bahwa semakin jauh keberadaan elektron dari inti, maka semakin kecil peluang ditemukannya elektron dalam atom deuterium (2) data distribusi ketidakpastian momentum bergantung pada bilangan kuantum utama (n) dan bilangan kuantum azimuth (l), serta jarak elektron dari inti atom (r). Semakin meningkat jarak elektron dari inti atom pada bilangan kuantum utama dan azimuth yang sama, maka akan menghasilkan kenaikan simultan dalam ketidakpastian posisi radial serta menghasilkan penurunan simultan dalam ketidakpastian momentum radial, sehingga semakin kecil ketidakpastian (semakin besar kepastian) dalam mengukur posisi yang tepat, semakin tidak akurat momentum partikelnya.

Kata kunci: *Pendekatan Ketidakpastian Heisenberg, Ketidakpastian Momentun Atom Deuterium, Bilangan Kuantum n ≤ 3.*

PENDAHULUAN

Berdasarkan pertimbangan sifat kesimetrisan alam, pada tahun 1924 de Broglie mengajukan hipotesa bahwa jika gelombang dapat bersifat partikel maka partikel dalam hal ini seharusnya juga dapat bersifat sebagai gelombang. Bagi setiap partikel yang bermassa m dan bergerak dengan laju v dapat berperilaku sebagai gelombang dengan panjang gelombang de Broglie $\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$. Hipotesa de Broglie tentang dualisme gelombang partikel ini yang melatar belakangi adanya teori baru yaitu teori mekanika kuantum (Krane, 1992:126).

Salah satu dari perkembangan teori mekanika kuantum saat ini yang paling berpengaruh adalah mengenai gejala atom hidrogen. Salah satu isotop hidrogen yaitu deuterium dengan simbol D atau $^{2}_{1}H$ yang memiliki sifat kuantum mirip dengan atom hidrogen. Deuterium memiliki sebuah inti yang disebut deuteron yang terdiri dari 1 proton dan 1 neutron. Sehingga dalam hal ini deuterium merupakan atom yang sifatnya hidrogenik. Dalam penelitian Lavenda et al (Tanpa Tahun) mengatakan bahwa Deuteron (inti atom deuterium) terbentuk antara reaksi fusi dengan inti dua atom hidrogen (penggabungan inti dua atom hidrogen) dengan gaya tarik mutual.

Pemanfaatan atom Deuterium di dalam aplikasinya berperan dalam proses produksi air berat. Air berat (D_2O) tersebut digunakan sebagai moderator neutron dalam reaksi fisi uranium. Fungsi moderator adalah untuk memperlambat neutron dengan cara menyerap energi dan menumbuk neutron tanpa kencenderungan menyerap partikelnya (Beiser, 1990:496). Untuk mendapatkan Air berat (D2O) tersebut maka bisa dilakukan dengan pemisahan dari air biasa (H2O). Sukarsono et al (2008) mengatakan bahwa beberapa metode yang dapat dilakukan dalam proses pengayaan air berat antara lain: metode destilasi, elektrolisa, dan pertukaran isotop. Dalam kondisi ultra-padat, deuterium juga dapat dimanfaatkan dalam proses induksilaser untuk mengamati partikel dengan energi > 10 MeV (Holmlid, 2013).

Sifat gelombang dari partikel dalam mekanika kuantum dapat dijelaskan dengan persamaan Schrodinger. Persamaan Schrodinger adalah suatu persamaan differensial orde dua yang taat pada hipotesa de Broglie dan hukum kekekalan energi. Berdasarkan karakteristiknya persamaan Schrodinger dibagi menjadi persamaan Schrodinger bergantung waktu dan persamaan schrodinger bebas waktu (tunak). Persamaan Schrodinger yang hanya dipengaruhi oleh potensial (V) dan kedudukan (r) merupakan persamaan Schrodinger tunak. Persamaan Schrodinger banyak digunakan pada atom – atom yang sifatnya hidrogenik. Salah satu atom yang sifatnya Hidrogenik adalah atom Deuterium atau isotop Hidrogen. Solusi dari persamaan Schrodinger disebut fungsi Schrodinger yang memiliki sifat linear, bernilai tunggal dan berhingga (krane, 1992: 419). Supriadi et al (2018) menyimpulkan bahwa fungsi gelombang atom deuterium terdiri dari 2 fungsi yaitu fungsi radial dan fungsi angular. Fungsi gelombang radial yang telah dinormalisasi dapat digunakan untuk menggambarkan karakteristik dari suatu gelombang.

Dalam Fisika kuantum, besaran-besaran fisis yang didapatkan dalam proses pengukuran bersifat ketidakpastian. Barukčić (2016) menyatakan bahwa salah satu asas ketidakpastian dalam kuantum adalah asas Ketidakpastian Heisenberg yang menganggap bahwa posisi dan momentum tidak bisa ditentukan pada saat yang bersamaan, karena semakin kecil ketidakpastian (semakin besar kepastian) dalam mengukur posisi yang tepat, maka semakin tidak akurat momentum partikelnya, demikian sebaliknya. Yusron et al (2007) menyatakan bahwa kedudukan elektron dalam suatu atom tidak dapat ditentukan dengan pasti, yang dapat ditentukan adalah probabilitas menemukan elektron sebagai fungsi jarak dari inti atom. Dalam penelitian Kuo (2004) bahwa untuk memperoleh suatu nilai ketidakpastian ada berbagai cara yang bisa dilakukan, salah satunya dengan menggunakan teori ketidakpastian Heisenberg.

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, digunakan pendekatan ketidakpastian Heisenberg guna mencari besarnya ketidakpastian momentum. Berdasarkan teori fisika kuantum, bahwa kedudukan elektron dalam suatu atom tidak dapat ditentukan dengan pasti, yang dapat ditentukan adalah probabilitas menemukan elektron sebagai fungsi jarak dari inti atom. Untuk persamaan – persamaan probabilitas memiliki arti fisis bahwa nilai probabilitas tidak bergantung pada fungsi sudut (fungsi Azimuth dan fungsi Polar) tetapi hanya bergantung pada fungsi Radial saja, sehingga dalam penelitian ini lebih difokuskan pada fungsi gelombang radialnya. Fungsi gelombang radial dapat diperoleh dengan persamaan schroodinger tunak koordinat bola karena energi potensial partikel dalam banyak situasi tidak bergantung pada waktu tetapi hanya bergantung kedudukan elektron didalam atom. Persamaan Schrodinger tunak dalam koordinat bola diberikan oleh:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{1}{r^2}\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial}{\partial r}\right)+\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{\sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial\phi^2}\right]\psi_{(r,\theta,\phi)}+[V(r)-E]\psi_{(r,\theta,\phi)}=0 \quad (1)$$

Teknik efektif yang digunakan dalam menyelesaikan tipe persamaan differensial tersebut adalah metode separasi variabel [16]. Dalam menggunakan metode separasi variabel, kita asumsikan solusi dari fungsi gelombang $\psi_{(r,\theta,\phi)}$ sebagai kombinasi linear dari fungsi yang bergantung pada jari-jari (r) dan fungsi yang bergantung pada sudut (θ,ϕ) sebagai berikut

$$\psi_{(r,\theta,\phi)}=R(r)Y(\theta,\phi) \quad (2)$$

Dengan mensubtitusikan persamaan (2) kedalam persamaan (1) akan didapatkan

$$\left[\frac{1}{R(r)}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial R(r)}{\partial r}\right)+\frac{2mr^2}{\hbar^2}[E-V(r)]\right]+\left[\frac{1}{Y(\theta,\phi)\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial Y(\theta,\phi)}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{Y(\theta,\phi)\sin^2\theta}\frac{\partial^2 Y(\theta,\phi)}{\partial\phi^2}\right]=0 \quad (3)$$

Persamaan (3) terbagi kedalam dua suku, yaitu suku yang pertama hanya bergantung pada jari-jari (r) dan suku yang kedua bergantung pada sudut (θ,ϕ). Apabila dipilih konstanta pemisah berharga $l(l+1)$, maka persamaan (3) dapat dipisah menjadi suku yang hanya bergantung jari-jari (r)

$$\frac{1}{R(r)}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial R(r)}{\partial r}\right)+\frac{2mr^2}{\hbar^2}[E-V(r)]=l(l+1) \quad (4)$$

Dan suku yang bergantung sudut (θ,ϕ)

$$\frac{1}{Y(\theta,\phi)\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial Y(\theta,\phi)}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{Y(\theta,\phi)\sin^2\theta}\frac{\partial^2 Y(\theta,\phi)}{\partial\phi^2}=-l(l+1) \quad (5)$$

Kita dapat menamai suku yang hanya bergantung jari-jari (r) pada persamaan (4) sebagai persamaan radial. Kemudian dengan mendefinisikan variabel baru berikut

$$U(r)=rR(r) \quad (6)$$

Akan didapatkan persamaan radial dalam bentuk

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2 U(r)}{\partial r^2}+\left[V(r)+\frac{\hbar^2}{2m}\frac{l(l+1)}{r^2}\right]U(r)=EU(r) \quad (7)$$

Melihat pada persamaan (7), maka kita dapat menuliskan persamaan radial atom deuterium sebagai berikut

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu}\frac{\partial^2 U(r)}{\partial r^2}+\left[\left(-\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r}\right)\frac{\hbar^2}{2\mu}\frac{l(l+1)}{r^2}\right]U(r)=EU(r) \quad (8)$$

Sehingga diperoleh solusi umum dari persamaan radial atom deuterium yaitu:

$$R_{nl}(r)=\frac{1}{r}U_{nl}(r)=N_{nl}\left(\frac{2r}{na_0}\right)^l L_{n+1}^{2l+1}\left(\frac{2r}{na_0}\right)e^{-r/na_0} \quad (9)$$

Untuk membuktikan bahwa partikel benar benar berada dalam ruangan maka diperlukan normalisasi terhadap fungsi gelombang (Ψ) yaitu:

$$\int_{-\infty}^{\infty}|\Psi(r)|^2dr=1 \quad (10)$$

Karena peluang kebolehjadian adalah kuadrat nilai multak dari fungsi gelombang radial, maka

$$P=\int_{-\infty}^{\infty}r^2R^2dr \quad (11)$$

Informasi mengenai kedudukan sebuah elektron dapat dicari dari harga ekspektasi dengan menggunakan fungsi gelombang (ψ) dengan menganggap bahwa elektron berada dalam tiga dimensi maka persamaan harga ekspektasinya adalah :

$$\langle r\rangle=\int_{-\infty}^{\infty}r^3R^2dr \quad (12)$$

Setelah diketahui untuk probabilitas dan nilai ekspektasi dari atom deuterium maka selanjutnya akan mencari probabilitas, nilai ekspektasi dan nilai ekspektasi kuadrat pada atom Deuterium untuk berbagai keadaan terhadap posisi guna merumuskan ketidakpastian momentum dengan pendekatan ketidakpastian Heisenberg pada atom Deuterium (^2_1H) dengan harga ekspektasi kuadrat adalah :

$$\langle r^2\rangle=\int_{-\infty}^{\infty}r^4R^2dr \quad (13)$$

Maka akan diperoleh suatu harga ketidakpastian posisi radial adalah:

$$\Delta r=\sqrt{\langle r^2\rangle-\langle r\rangle^2} \quad (14)$$

Sehingga untuk besarnya ketidakpastian momentum radial atom deuterium yaitu menggunakan pendekatan ketidakpastian heisenberg:

$$\Delta P_r\cdot\Delta r\geq\frac{\hbar}{2} \quad (15)$$

Jenis penelitian ini berupa penelitian non eksperimen yang dilakukan dengan study literatur. Langkah-langkah dalam penelitian ini meliputi :

a. Persiapan

Pada tahap ini mempersiapkan bahan-bahan yang diperlukan untuk dijadikan informasi dengan cara mengumpulkan buku-buku tentang fisika modern, fisika kuantum, fisika matematika, fisika atom, artikel, jurnal, dan berbagai sumber berskala nasional hingga internasional yang relevan.

b. Pengembangan Teori

Pada tahap ini peneliti mengembangkan teori yang sudah ada pada buku literatur maupun jurnal mengenai ketidakpastian posisi dan momentum dari sebuah elektron dalam osilator harmonik maupun dalam atom hidrogen. Sehingga dalam hal ini untuk teori yang dikembangkan adalah ketidakpastian momentum radial atom Deuterium (^2_1H) dengan menggunakan pendekatan ketidakpastian Heisenberg pada bilangan kuantum n ≤ 3.

c. Validasi

Pada tahap ini peneliti membandingkan nilai probabilitas posisi, nilai ekspektasi posisi elektron, dan ketidakpastian momentum radial hasil pengembangan teori dengan teori yang ada dalam literatur.

d. Hasil Pengembangan Teori

Pada tahap ini peneliti telah memvalidasi hasil pengembangan teori untuk menghasilkan suatu produk berupa nilai ketidakpastian momentum radial atom Deuterium (^2_1H) menggunakan pendekatan ketidakpastian Heisenberg pada bilangan kuantum n ≤ 3.

e. Simulasi

Pada tahap simulasi adalah tahap perhitungan untuk menentukan Probabilitas, nilai ekspektasi, dan nilai ketidakpastian momentum pada atom deuterium pada bilangan kuantum n ≤ 3 dengan menggunakan software matlab (R.2013a) dengan metode simpson rule.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Jari-jari Bohr Atom Deuterium dari *study* literatur diperoleh data berbagai ketetapan sebagai berikut:

Konstanta Planck ($\hbar$ = 1,0546 $\times\ 10^{-34}$ J.s)

Massa proton (m_p = 1,6726$\times\ 10^{-27}$ kg)

Massa elektron (m_e = 9,1094 $\times\ 10^{-31}$kg)

Massa neutron (m_n = 1,675 $\times\ 10^{-27}$kg)

Konstanta struktur halus

($\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} = 2{,}307113707464\ \times 10^{-28}$)

Sesuai dengan teorinya bahwa atom deuterium memiliki elektron 1, neutron 1 dan proton 1 sehingga massa inti atom deuterium (deuteron) merupakan gabungan massa proton dan neutron yaitu

$m_{deutron}\ =\ 3{,}3476 \text{ x } 10^{-27}\text{kg}$

sehingga diperoleh massa tereduksi untuk sistem atom deuterium adalah

$$\mu = 9{,}0847 \times\ 10^{-31} \text{ kg}$$

Hasil penyelesaian persamaan Schrödinger pada atom deuterium diperoleh persamaan jari-jari bohr atom deuterium adalah

$$a_0 = \frac{n^2\hbar^2 4\pi\varepsilon_0}{Ze^2\mu}$$

Dengan mensubstitusikan ketetapan - ketetapan yang ada maka diperoleh jari-jari Bohr atom deuterium adalah

$$a_0 =\ 0{,}0530625\ \times 10^{-9} \text{ m.}$$

Bila dibandingkan dengan jari-jari bohr atom hidrogen (a_0 = 5,29177663248×10 m) maka jari-jari bohr atom deuterium lebih besar daripada atom hidrogen, karena massa tereduksi sistem electron deuteron lebih kecil daripada massa tereduksi sistem elektron-proton. Sehingga perbedaan antara deuterium dan hidrogen adalah ukuran deuterium lebih besar dari ukuran hidrogen.

Dengan menyelesaikan persamaan Schrödinger atom deuterium yang ternormalisasi diperoleh fungsi gelombang radial sebagai berikut.

$$L_p^q = L_{n+l}^{2l+1}(\rho)$$

$$= (-1)^{2l+1}\frac{(n+l)!}{(n-l-1)!}\frac{e^{\frac{2r}{na_0}}}{}\frac{d^{n+l}}{d\left(\frac{2r}{na_0}\right)^{n+l}}$$

$$\left(e^{-\frac{2r}{na_0}}\left(\frac{2r}{na_0}\right)^{n-l-1}\right)$$

$$R_{nl} = \sqrt{\left(\frac{2}{na_0}\right)^3 \frac{(n-l-1)!}{2n\left((n+l)!\right)^3}}$$

$$\left(\frac{2r}{na_0}\right)^l e^{-\frac{r}{na_0}} L_{n+l}^{2l+1}\left(\frac{2r}{na_0}\right)$$

Dari hasil penyelesaian di atas diperoleh bahwa fungsi radial yang bergantung pada bilangan kuantum utama dan bilangan kuantum azimut. Fungsi gelombang azimut ini menggambarkan elektron atom deuterium berotasi disekitar sumbu z secara periodik (ϕ) ϕ dengan amplitudo gelombang sebesar $\sqrt{\frac{1}{2\pi}}$. Tabel 1 berikut menunjukan bentuk fungsi gelombang radial atom deuterium.

Tabel 1. Hasil fungsi gelombang radial atom deuterium pada bilangan kuantum utama

$$(n) \leq 3$$

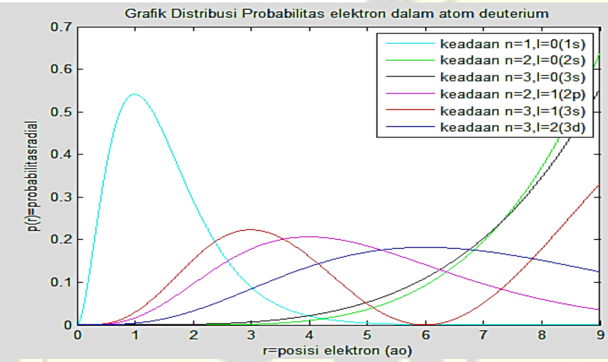
n	*l*	m	$R_{nl}(r)$
1	0	0	$\frac{2}{a_0^{3/2}} e^{-r/a_0}$
2	0	0	$\frac{1}{(2a_0)^{3/2}}\left(2-\frac{r}{a_0}\right)e^{-r/2a_0}$
	1	-1	$\frac{1}{\sqrt{3}(2a_0)^{3/2}}\left(\frac{r}{a_0}\right)e^{-r/2a_0}$
		0	
		1	
3	0	0	$\frac{2}{(3a_0)^{3/2}}\left(1-\frac{2r}{3a_0}+\frac{2r^2}{27a_0^2}\right)e^{-r/3a_0}$
	1	-1	$\frac{8}{9\sqrt{2}(3a_0)^{3/2}}\left(\frac{r}{a_0}+\frac{r^2}{6a_0^2}\right)e^{-r/3a_0}$
		0	
		1	
	2	-2	$\frac{4}{27\sqrt{10}(3a_0)^{3/2}}\left(\frac{r^2}{a_0^2}\right)e^{-r/3a_0}$

Untuk mengetahui keberadaan elektron dalam atom dapat diprediksi melalui nilai probabilitas. Nilai probabilitas dari fungsi gelombang radial menunjukan peluang ditemukanya elektron dalam ruang. Pada penelitian ini menunjukan bahwa semakin besar bilangan kuantum utama (n) mengakibatkan semakin kecil nilai probabilitasnya. Sehingga semakin besar bilangan kuantum utama (n) peluangnya sangat kecil untuk menemukan elektron dalam atom. Pada kedudukan elektron berada di jari - jari atom, untuk bilangan kuantum utama n = 3 dan bilangan kuantum azimut *l* = 2 nilai probabilitas fungsi gelombang radial adalah 0, hal ini berarti elektron tidak ditemukan pada orbital tersebut (Hermanto, 2016: 801). Tabel 2 berikut menunjukan hasil simulasi nilai probabilitas elektron dalam atom deuterium.

Tabel 2. Hasil Simulasi Probabilitas Elektron Atom Deuterium

r	***n* = 1**	***n* = 2**		***n* = 3**		
	***l* = 0**	***l* = 0**	***l* = 1**	***l* = 0**	***l* = 1**	***l* = 2**
a_o	0.3233235838	0.0343164669	0.0036598468	0.0098663607	0.0012585444	0.0000064984
2 a_o	0.7618966944	0.0526530173	0.0526530173	0.0143532099	0.0169244974	0.0004682578
3 a_o	0.9380311955	0.0727158516	0.1847367555	0.0225785099	0.0526530173	0.0045338055
4 a_o	0.9862460322	0.1757962500	0.3711630648	0.0535487651	0.0887935335	0.0193884511
5 a_o	0.9972306042	0.3489458712	0.5595067149	0.0899026550	0.1075738146	0.0532010158
6 a_o	0.9994777419	0.5364733430	0.7149434997	0.1106739784	0.1106739784	0.1106739784
7 a_o	0.9999060372	0.6966852612	0.8270083921	0.1147766271	0.1137934176	0.1908771177
8 a_o	0.9999836824	0.8144891668	0.9003675995	0.1171017983	0.1336791581	0.2879993072
9 a_o	0.9999972434	0.8925563393	0.9450363585	0.1349154903	0.1795330295	0.3936972176

Untuk rapat probabilitas radial merepresentasikan besarnya probabilitas guna menemukan elektron di dalam ruang pada tiap satuan panjang. Grafik distribusi probabilitas menunjukan grafik fungsi P(r) dalam hal ini sebagai fungsi dari posisi (r) untuk berbagai orbital. Peluang maksimum dalam orbital yaitu diperoleh pada r = a_o hal ini sesuai dengan ramalan Bohr tentang jari-jari orbital elektron pada n = 1. Secara umum untuk hasil simulasi dari grafik distribusi rapat probabilitas elektron atom hidrogen yang dilakukan peneliti telah sesuai bentuknya dengan grafik distribusi rapat probabilitas atom hidrogen pada buku fisika modern dan fisika kuantum. Selanjutnya peneliti mengembangkan teori untuk atom deuterium dengan bilangan kuantum yang sama dan diperoleh hasil simulasi grafik fungsi distribusi probabilitas atom deuterium seperti pada gambar 1 berikut.



Gambar 1. Grafik distribusi rapat probabilitas elektron dalam atom deuterium

Telah dijelaskan bahwa dalam teori kuantum, kedudukan suatu elektron dalam atom tidak dapat ditentukan secara pasti, yang dapat ditentukan hanyalah probabilitas untuk menemukan elektron sebagai fungsi jarak dari inti atom. Heisenberg menyatakan bahwa hubungan ketidakpastian momentum radial dan posisi radial suatu atom sebagai berikut:

$\Delta P_r \Delta r \geq \frac{\hbar}{2}$, dengan $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ = 1,054 x 10^{-34} Js

Hal ini menandakan bahwa semakin besar keakuratan dalam pengukuran posisi, semakin tidak tepat pengukuran momentumnya, maupun sebaliknya. Karena itu, tidak mungkin untuk mengukur dengan tepat posisi dan momentum secara fisik suatu partikel pada saat yang bersamaan. Serta menandakan bahwa hasil kali dari dua ketidakpastian tersebut tidak mungkin lebih kecil daripada $\frac{\hbar}{2}$ (konstanta). Tabel 3 berikut menunjukan hasil perhitungan serta simulasi nilai ketidakpastian momentum dengan pendekatan ketidakpastian Heisenberg.

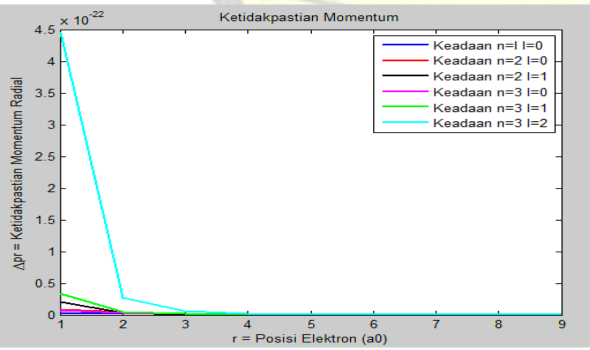
Tabel 3. Hasil Simulasi Nilai Ketidakpastian Momentum dengan Pendekatan Ketidakpastian Heisenberg untuk Atom Deuterium $(n) \leq 3$

n	l	r	Δr	Δp_r
1	0	a_0	1.771511487782686 · 10^{-11}	2.974860753850487 · 10^{-24}
		$3a_0$	3.830592480733646 · 10^{-11}	1.375766288506543 · 10^{-24}
		$5a_0$	4.455068834681714 · 10^{-11}	1.182922238815757 · 10^{-24}
		$7a_0$	4.573603766681885 · 10^{-11}	1.152264225071545 · 10^{-24}
		$9a_0$	4.583113956410012 · 10^{-11}	1.149873219414346 · 10^{-24}
2	0	a_0	6.541739786363669 · 10^{-12}	8.055960909642683 · 10^{-24}
		$3a_0$	2.291737678994546 · 10^{-11}	2.299565106557966 · 10^{-24}
		$5a_0$	9.914704595864239 · 10^{-11}	5.315337385037468 · 10^{-25}
		$7a_0$	1.346306352881340 · 10^{-10}	3.914413676145286 · 10^{-25}
		$9a_0$	1.301504742255004 · 10^{-10}	4.049159276107691 · 10^{-25}
	1	a_0	2.640225783385968 · 10^{-12}	1.996041411746789 · 10^{-23}
		$3a_0$	4.819589531159852 · 10^{-11}	1.093454113867609 · 10^{-24}
		$5a_0$	9.827031894952862 · 10^{-11}	5.362758619626195 · 10^{-25}
		$7a_0$	1.095410465684172 · 10^{-10}	4.810981969857719 · 10^{-25}
		$9a_0$	1.090675340211314 · 10^{-10}	4.831868664949331 · 10^{-25}
3	0	a_0	3.525125697463484 · 10^{-12}	1.494982151641301 · 10^{-23}
		$3a_0$	1.423270081763639 · 10^{-11}	3.702740658659600 · 10^{-24}

ISSN : 2527 – 5917, Vol.4 No 1.
SEMINAR NASIONAL PENDIDIKAN FISIKA 2019
"Integrasi Pendidikan, Sains, dan Teknologi dalam Mengembangkan Budaya Ilmiah di Era Revolusi Industri 4.0 "
17 NOVEMBER 2019

n	l	r	Δr	Δp_r
		$5a_0$	5.561301422669809 · 10^{-11}	9.476199183373943 · 10^{-25}
		$7a_0$	7.048434741797091 · 10^{-11}	7.476837330633133 · 10^{-25}
		$9a_0$	9.246664097416331 · 10^{-11}	5.699352701124424 · 10^{-25}
		a_0	1.548210233168920 · 10^{-12}	3.403930478623188 · 10^{-23}
		$3a_0$	2.704461832694719 · 10^{-11}	1.948631678321371 · 10^{-24}
	1	$5a_0$	5.225325481203528 · 10^{-11}	1.008549614556485 · 10^{-24}
		$7a_0$	5.741645546193984 · 10^{-11}	9.178553356525764 · 10^{-25}
		$9a_0$	1.182657091580728 · 10^{-10}	4.456067644219822 · 10^{-25}
		a_0	1.179479634625976 · 10^{-13}	4.468072059312128 · 10^{-2}
	2	$3a_0$	9.134495700866098 · 10^{-12}	5.769338749045904 · 10^{-24}
		$5a_0$	4.960378774832040 · 10^{-11}	1.062418867433857 · 10^{-24}
		$7a_0$	1.181812988493220 · 10^{-10}	4.459250364746041 · 10^{-25}
		$9a_0$	1.835106222704137 · 10^{-10}	2.871768366756636 · 10^{-25}

Untuk merepresentasikan besarnya ketidakpastian momentum radial pada setiap keadaan posisi elektron (r) dapat dilihat pada gambar 2 grafik berikut.



Gambar 2. Grafik momentum radial (ΔP_r) pada setiap keadaan posisi elektron (r) untuk atom deuterium n ≤ 3

Dari tabel 3 untuk hasil simulasi nilai ketidakpastian momentum dan gambar 2 untuk grafik momentum radial pada setiap keadaan posisi elektron untuk atom deuterium pada bilangan kuantum n ≤ 3 diperoleh hasil bahwa ketidakpastian momentum bergantung pada bilangan kuantum utama (n) dan bilangan kuantum azimuth (l), serta jarak elektron dari inti atom (r). Semakin meningkat jarak elektron dari inti atom pada bilangan kuantum utama dan azimuth yang sama, maka akan menghasilkan kenaikan simultan dalam ketidakpastian posisi radial serta menghasilkan penurunan simultan dalam ketidakpastian momentum radial, sehingga semakin kecil ketidakpastian (semakin besar kepastian) dalam mengukur posisi yang tepat, maka semakin tidak akurat momentum partikelnya. Dari perhitungan dan hasil tersebut juga diperoleh suatu ketidakpastian Δr dan ΔPr dalam atom deuterium ditemukan bukan nol, tepat, dan pasti jika bilangan kuantum n dan l dari orbit elektron itu diketahui.

PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data yang diperoleh, maka dapat di ambil kesimpulan bahwa ketidakpastian momentum bergantung pada bilangan kuantum utama (n) dan bilangan kuantum azimuth (l), serta jarak elektron dari inti atom (r). Semakin meningkat jarak elektron dari inti atom pada bilangan kuantum utama dan azimuth yang sama, maka akan menghasilkan kenaikan simultan dalam ketidakpastian posisi radial serta menghasilkan penurunan simultan dalam ketidakpastian momentum radial, sehingga semakin kecil ketidakpastian (semakin besar kepastian) dalam mengukur posisi yang tepat, maka semakin tidak akurat momentum partikelnya.

Saran

Saran yang dapat diberikan dalam penelitian ini adalah perlu diadakan penelitian lebih lanjut dalam bidang fisika teori mengenai atom deuterium dengan tambahan kajian nilai ketidakpastian posisi, atau energi pada atom deuterium dengan bilangan kuantum lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

Barukčić, I. 2016. Anti heisenberg – the end of heisenberg's uncertainty principle. *Journal of Applied Mathematics and Physics*. (4): 881 – 887.

Beiser, A. 1990. *Konsep Fisika Modern*. Edisi Keempat. Terjemahan oleh The Howling. Jakarta: Erlangga.

Hermanto, W. 2016. Fungsi Gelombang Atom Deuterium dengan Pendekatan Persamaan Schrodinger. *Jurnal Fisika Prosiding Semnas UNESA*. ISBN 978-602-72071-1-0.

Holmlid, L. 2013. Direct observation of particles with energy >10 MeV/u from laser-induced processes with energy gain in ultra-danse deuterium. *Laser and Particle Beams*. 10(31):715-722.

Kuo, C. D. 2004. The uncertainties in radial position and radial momentum of an electron in the non relativistic hydrogen atom. *Annals of Physics Jurnal*. 316: 431 – 439.

Krane, K. S. 1992. *Fisika Modern*. Jakarta: Universitas Indonesia Press.

Lavenda, S., Fuad, Y., & Abadi. Tanpa tahun. "Persamaan Schrodinger pada Dua Atom Hidrogen dengan Gaya Tarik Mutual." Tidak diterbitkan. Surabaya: Matematika, Universitas Negeri Surabaya.

Sukarsono, Dahroni, I., Herhady, D. 2008. Studi status pengayaan D2O. *Jurnal Ganendra*. 11(1):23-35.

Supriadi, B., S. H. B. Prastowo, S. Bahri, Z. R. Ridlo, and T. Prihandono. 2018. The stark effect on the wave function of tritium in relativistic condition. *Journal of Physics: Conference Series*. 997 012045: 1-7.

Yusron, M., Firdausi, K.S., Sumariyah. 2007. Review probabilitas menemukan elektron dengan fungsi gelombang simetri dan antisimetri pada molekul H_2^+ . *Jurnal Fisika*. 10(1):7-12.