

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Interaksi sebuah atom atau molekul dengan berkas cahaya, menyebabkan cahaya yang dipancarkan atau diserap membawa informasi berharga tentang struktur atom atau molekul.

Sebagaimana Allah berfirman dalam surat Ar-Rum ayat 48 yang berbunyi:

اللَّهُ الَّذِي يُرْسِلُ الرِّيحَ فَتَنِّيْرُ سَحَابًا فَيُبْسِطُهُ فِي السَّمَاءِ كَيْفَ يَشَاءُ وَيَجْعَلُهُ كِسْفًا فَرَى الْوَدْقَ
يَخْرُجُ مِنْ خِلِّهِ فَإِذَا أَصَابَ بِهِ مَنْ يَشَاءُ مِنْ عِبَادِهِ إِذَا هُمْ يَسْتَبْشِرُونَ ٨٤

yang artinya: “Allah, Dialah yang mengirimkan angin, lalu angin itu menggerakkan awan dan Allah membentangkannya di langit menurut yang Dia kehendaki, dan menjadikannya bergumpal-gumpal; lalu kamu melihat hujan keluar dari celah-celahnya. Maka apabila hujan itu turun mengenai hamba-hamba-Nya yang dikehendaki-Nya tiba-tiba mereka menjadi gembira.”

Ayat ini menggambarkan siklus air yang diatur oleh Allah, dari pengiriman angin hingga hujan yang turun. Ini bisa menjadi analogi untuk siklus pendinginan laser, karena energi cahaya (laser) digunakan untuk mengatur gerakan dan suhu atom dan fenomena ini mendasari seluruh bidang spektroskopi. Namun, interaksi foton dengan atom dapat digunakan untuk memanipulasi atom serta menyelidiki strukturnya. Misalnya, dalam pendekatan yang disebut pemompaan optik, yang ditemukan oleh Alfred Kastler pada tahun 1950-an, kita dapat menggunakan pertukaran resonansi momentum sudut antara atom dan foton terpolarisasi untuk menyelaraskan atau mengorientasikan putaran atom atau menempatkannya dalam situasi tak-setimbang. Kastler juga mengusulkan penggunaan pemompaan optik untuk mendinginkan dan

memanaskan derajat kebebasan internal, menyebut fenomena tersebut sebagai “*effet luminofrigorique*” dan “*effet luminocalorique*”. Contoh terkenal lainnya dari penggunaan interaksi foton-atom untuk mengendalikan atom adalah pendinginan laser (Claude, 1990).

Pendinginan laser dikaji dalam fisika atom modern. Pendinginan, penjebakan, dan manipulasi atom telah menghasilkan kemajuan dalam teknologi jam (Ludlow *et al.*, 2015; Campbell., 2017; Elvin *et al.*, 2019), sensor inersia (Cronin *et al.*, 2009; Becker *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2019), magnetometer (Kitching, 2018; Cohen *et al.*, 2019), berbagai teknologi kuantum (Pezz’e *et al.*, 2018), hingga pengujian simetri fundamental (Safronova *et al.*, 2018; E. B. Norrgard *et al.*, 2019).

Pada awalnya, pendinginan laser tampak sederhana, dengan model terkenal yang secara kualitatif menggambarkan fitur-fitur penting, seperti perangkat magneto-optik dan Doppler dan pendinginan sub-Doppler. Seiring kemajuan yang dicapai dalam penerapan atom berpendinginan laser dalam paket yang terintegrasi secara fotonik, pemodelan diperlukan untuk mengoptimalkan parameter desain dan memahami toleransi teknik. Pada saat yang sama, kemajuan sedang dicapai dalam pemahaman teoretis teknik baru pendinginan laser. Untuk kedua aplikasi ini, serangkaian perangkat lunak yang mudah digunakan bermunculan dan mampu mensimulasikan deskripsi lengkap pendinginan laser, termasuk struktur tingkat yang rumit dan geometri perangkat yang kompleks.

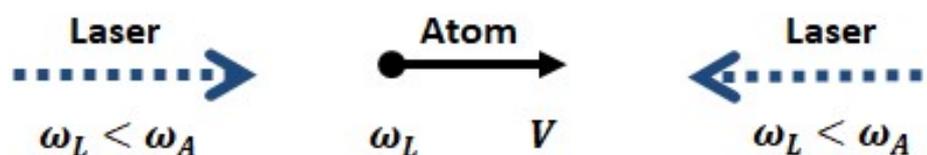
Sebelum membahas lebih jauh, perlu dijelaskan mengapa atom natrium (^{23}Na) dipilih. Natrium sering digunakan karena transisi energinya sesuai dengan panjang gelombang laser yang umum tersedia, yaitu sekitar 589 nm. Hal ini memudahkan proses pendinginan menggunakan laser. Pendinginan laser pada atom natrium (^{23}Na) adalah teknik yang efektif untuk memperlambat pergerakan atom hingga suhu mendekati nol absolut (Raab *et al.*, 1987).. Proses ini melibatkan penyeteran laser ke frekuensi transisi atom natrium. Ketika atom natrium menyerap foton dari sinar laser, momentum kecil diperoleh yang mengarah ke arah yang berlawanan dengan arah gerakan atom. Setelah itu,

mengarah ke arah yang berlawanan dengan arah gerakan atom. Setelah itu, atom akan melepaskan foton secara spontan ke segala arah. Efek dari banyak absorpsi dan emisi adalah pengurangan kecepatan atom dalam arah sinar laser. Teknik ini memungkinkan pengendalian atom dengan presisi tinggi, yang penting dalam berbagai eksperimen fisika kuantum dan teknologi baru seperti jam atom dan komputer kuantum.

Dalam konteks parameter fisika yang relevan, atom natrium memiliki beberapa karakteristik penting yang mempengaruhi proses pendinginan laser. Gamma (Γ) atau lebar garis alami transisi adalah sekitar 10 MHz, menunjukkan laju pemancaran foton setelah eksitasi. Massa atom natrium adalah sekitar 22.989769 amu, atau sekitar 3.82×10^{-26} kg, yang memainkan peran penting dalam menghitung kecepatan *recoil* atom setelah setiap foton dipancarkan. Bilangan gelombang (k) terkait dengan panjang gelombang transisi, yang sekitar 1.067×10^7 m⁻¹. Dengan menggunakan parameter-parameter ini dalam perhitungan yang tepat, seperti dalam rumus massa efektif, kondisi untuk pendinginan laser dapat diprediksi dan dioptimalkan, sehingga meningkatkan efisiensi dan efektivitas proses tersebut (Metcalf and Peter, 1999).

Dengan mempertimbangkan parameter fisika dari atom natrium, pemahaman mengenai prinsip dasar pendinginan Doppler menjadi sangat diperlukan, karena metode ini efektif dalam mengurangi energi kinetik atom melalui interaksi dengan laser. Prinsip pendinginan Doppler untuk atom bebas dapat diilustrasikan dengan baik oleh atom dua tingkat dalam gelombang berdiri laser lemah dengan frekuensi ω_L dan frekuensi resonansi atom ω_A (Gambar 1.1). Masing-masing dari dua sinar laser yang merambat balik yang membentuk gelombang berdiri memberikan tekanan rata-rata pada arah rambatnya karena atom menyerap foton ke arah tersebut tetapi memancarkan foton secara isotropis (ke segala arah), misalnya atom dalam keadaan diam. Tekanan radiasi yang diberikan oleh dua gelombang yang merambat balik seimbang, dan gaya total yang dialami atom dirata-ratakan sepanjang gelombang menghilang. Jika atom bergerak sepanjang gelombang berdiri dengan kecepatan v , maka gelombang yang

merambat berlawanan mengalami pergeseran Doppler yang berlawanan $\pm\omega_L v/c = \pm kv$, dan k adalah bilangan gelombang foton. Frekuensi gelombang yang merambat berlawanan dengan atom semakin mendekati resonansi dan gelombang ini memberikan tekanan radiasi yang lebih kuat pada atom dibandingkan gelombang yang merambat searah atom, yang semakin menjauhi resonansi. Ketidakseimbangan antara kedua tekanan radiasi menghasilkan gaya gesekan total rata-rata F , yang berlawanan dengan kecepatan atom v . Jika v cukup rendah, gaya tersebut dapat dinyatakan sebagai $F = -av$, dengan a adalah koefisien gesekan.



Gambar 1.1. Atom bergerak sejajar dengan gelombang berdiri yang dibentuk oleh dua sinar laser berlawanan arah

Pendinginan Doppler merupakan metode pendinginan laser yang paling mendasar yang digunakan dalam eksperimen gas kuantum. Teknik ini dapat mendinginkan sistem dua tingkat hingga suhu sekitar $\hbar\Gamma/k_B$ (Y.Castin and J.Dalibard, 1989), Γ adalah lebar garis alami transisi atom, \hbar dan k_B adalah konstanta Planck tereduksi dan konstanta Boltzmann. Validitas ekspresi ini terbatas pada kasus ketika $\hbar\Gamma$ melebihi energi recoil, yang diberikan oleh $E_r = \hbar^2 k^2 / 2m$, dengan m massa atom dan k bilangan gelombang (H.Wallis, 1995).

Pendinginan laser dan pembelokan berkas atom diusulkan pada tahun 1975 adalah manifestasi gaya radiasi yang Ashkin sebut sebagai “gaya hamburan”, karena gaya ini terjadi ketika cahaya menumbuk suatu benda dan dihamburkan ke arah yang acak. Gaya radiasi lainnya, gaya dipol, dapat dianggap timbul dari interaksi antara momen dipol terinduksi dan gradien medan cahaya yang datang. Gaya dipol telah dikenali setidaknya sejak tahun 1962 oleh Askar’yan (Askar’yan,

1962), dan pada tahun 1968, Letokhov mengusulkan penggunaannya untuk menjebak atom bahkan sebelum gagasan pendinginan laser. Perangkat yang diusulkan oleh Ashkin pada tahun 1978 juga mengandalkan gaya “dipol” atau “medan”. Namun demikian, pada tahun 1978, pendinginan laser, pengurangan kecepatan acak, dipahami hanya melibatkan gaya hamburan. Perangkat laser, pengurangan dalam potensial yang diciptakan oleh cahaya, melibatkan gaya dipol dan hamburan. Namun, gaya dipol juga terlihat berdampak besar pada pendinginan laser (Dalibard and Tannoudji, 1989).

Pada pembahasan di atas memberikan wawasan mendalam tentang mekanisme efek mekanis cahaya dan pendinginan laser, yang dapat digunakan untuk mengembangkan teknik pendinginan lebih lanjut yang lebih efisien dan efektif. Temuan ini mendukung pemahaman teoritis yang lebih baik dan dapat dijadikan referensi untuk penelitian lanjutan dalam bidang fisika kuantum dan teknologi optik. Peneliti tertarik untuk melakukan penelitian tentang fisika kuantum dan teknologi optik *via Doppler Cooling* dengan judul “Efek mekanis cahaya dan pendinginan laser *via Doppler Cooling*”. Adapun penelitian ini memberikan pembaruan yakni memvariasikan parameter *detuning* Δ , yaitu selisih antara frekuensi laser dengan frekuensi resonansi atom, yang menentukan seberapa jauh frekuensi laser menyimpang dari frekuensi resonansi atom. Serta persamaan gaya hamburan terhadap kecepatan dengan memvariasikan parameter ω_{21} , yaitu frekuensi transisi resonansi antara dua tingkat energi atom, lalu membandingkan hasil dari persamaan gaya hamburan terhadap kecepatan dengan hasil simulasi numerik menggunakan PyLCP, yang merupakan suatu *toolbox* untuk pendinginan laser. Dengan adanya pembaharuan tersebut diharapkan dapat memperkaya penelitian bidang teori fisika kuantum dan teknologi optik dalam konteks efek mekanis cahaya dan pendinginan laser *via Doppler Cooling*.

1.2 Batasan Masalah

Peneliti memberikan beberapa batasan masalah pada penelitian agar lebih sistematis dan terarah yaitu:

- Penelitian ini membatasi analisis pada sistem atom dua tingkat, yaitu atom natrium (^{23}Na)
- Penelitian ini hanya mengeksplorasi variasi parameter laser yaitu *detuning* Δ dan ω_{21} .
- Penelitian ini menggunakan model teoretis yang digunakan berdasarkan persamaan Bloch optik (PBO) dan model semianalitik dengan menggunakan persamaan gaya hamburan dari *Fermi's golden rule* sesuai teori gangguan (*perturbation*) bergantung waktu.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan di atas, peneliti merumuskan masalah penelitian yaitu bagaimana efek mekanis cahaya dan pendinginan laser *via Doppler cooling* pada atom ^{23}Na ?

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini yaitu mengetahui detail efek mekanis cahaya dan pendinginan laser *via Doppler cooling* pada atom ^{23}Na .

1.5 Manfaat Penelitian

Beberapa manfaat dari penelitian akan berkontribusi bagi akademisi, peneliti maupun masyarakat umum. Berikut manfaat dari penelitian:

1.5.1 Manfaat Teoretis

1. Mendukung kajian Fisika Kuantum dalam mempelajari struktur materi penyusun alam semesta.

2. Sebagai referensi dalam studi pendinginan laser, atau penelitian lain yang menganalisis metode yang serupa.
3. Menyediakan pengetahuan dasar yang esensial dalam fisika kuantum dan interaksi atom-foton, yang dapat digunakan sebagai fondasi untuk studi lanjutan dalam berbagai aplikasi ilmiah dan teknologi.
4. Penelitian ini mengembangkan dan memvalidasi model teoretis menggunakan persamaan Bloch optik (PBO) dan persamaan gaya hamburan untuk menjelaskan interaksi antara atom dan medan laser, yang dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian lebih lanjut.

1.5.2 Manfaat Praktis

1. Penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan dan pengalaman langsung tentang cara meningkatkan kemampuan sains di bidang fisika kuantum melalui metode eksperimen.
2. Penelitian ini memberikan pelatihan praktis bagi mahasiswa dan peneliti dalam menggunakan teknologi pendinginan laser, yang penting untuk pengembangan sumber daya manusia yang kompeten di bidang fisika dan teknologi.
3. Penelitian ini memberikan saran eksperimen yang lebih efisien untuk pendinginan laser dan penjebakan atom, yang dapat digunakan dalam penelitian dan pendidikan.