



Kajian Deskriptif Kualitatif Spektrum Atom Hidrogen dalam Kontribusi Pembentukan Model Atom Bohr

A Qualitative Descriptive Study of the Hydrogen Atom Spectrum and Its Contribution to the Formation of the Bohr Atomic Model

Peronika Simamora^{1*}, Zukhrufi nahla², Salsabila indah ramadani³, Winda sari siregar⁴, Shintia monauli sinurat⁵, Ladestam Sitinjak⁶, Deo Demonta Panggabean⁷

Universitas Negeri Medan

Email: peronikasimamora1@gmail.com¹, zukhrufinahla53@gmail.com², salsabilah.4243121055@mhs.unimed.ac.id³

windasari.4242121009@mhs.unimed.ac.id⁴, Shintiamona.4242421017@mhs.unimed.ac.id⁵

ladestamsitinjak4@gmail.com⁶, deo.panggabean@unimed.ac.id⁷

Article Info

Article history :

Received : 05-10-2026

Revised : 07-10-2026

Accepted : 09-10-2026

Published : 11-10-2026

Abstract

The Thomson and Rutherford atomic models could not explain two fundamental empirical facts: the stability of atoms and the emission of discrete line spectra. This study examines, through a qualitative descriptive approach, how the emission spectrum of atomic hydrogen served as the empirical foundation for Niels Bohr's 1913 atomic model. The method is library research with a historical-conceptual approach; primary documents (the papers of Balmer, Rydberg, Rutherford, and Bohr) and secondary documents (textbooks and journal articles from 2021–2026) were analysed using qualitative content analysis. The findings show that (i) classical electrodynamics predicts the collapse of the Rutherford atom within about 10^{-11} s and a continuous spectrum; (ii) the regularities of the Lyman, Balmer, Paschen, Brackett, and Pfund series are summarised by the Rydberg formula $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$; (iii) Bohr's postulates—stationary orbits, angular-momentum quantisation $L = n\hbar$, and the frequency condition $h\nu = E_{n_2} - E_{n_1}$ —yield $E_n = -13.6\text{eV}/n^2$ and $R_\infty = m_e e^4 / (8\varepsilon_0^2 h^3 c)$; and (iv) the theoretical wavelengths of five Balmer lines, corrected for reduced mass, agree with experimental data to within a relative difference below 0.002%. It is concluded that the hydrogen spectrum was the key empirical clue that compelled physics to introduce quantisation into atomic structure, even though the Bohr model was later superseded by quantum mechanics.

Keywords : *hydrogen atomic spectrum; Bohr atomic model; Balmer series*

Abstrak

Model atom Thomson dan Rutherford tidak mampu menjelaskan dua fakta empiris mendasar: kestabilan atom dan pancaran spektrum garis diskrit. Penelitian ini bertujuan mengkaji secara deskriptif kualitatif bagaimana spektrum emisi atom hidrogen menjadi landasan empiris bagi pembentukan model atom Niels Bohr (1913). Metode yang digunakan adalah kajian pustaka (*library research*) dengan pendekatan historis-konseptual; data berupa dokumen primer (makalah Balmer, Rydberg, Rutherford, dan Bohr) serta dokumen sekunder (buku teks dan artikel jurnal 2021–2026) dianalisis dengan analisis isi kualitatif. Hasil kajian menunjukkan bahwa (i) elektrodinamika klasik memprediksi keruntuhan atom Rutherford dalam orde 10^{-11} s dan spektrum kontinu; (ii) regularitas deret Lyman, Balmer, Paschen, Brackett, dan Pfund



terangkum dalam rumus Rydberg $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$; (iii) postulat Bohr tentang orbit stasioner, kuantisasi momentum sudut $L = n\hbar$, dan frekuensi Bohr $h\nu = E_{n_2} - E_{n_1}$ menghasilkan $E_n = -13,6 \text{ eV}/n^2$ serta $R_\infty = m_e e^4 / (8\epsilon_0^2 h^3 c)$; dan (iv) panjang gelombang teoretis lima garis Balmer dengan koreksi massa tereduksi bersesuaian dengan data eksperimen dalam selisih relatif kurang dari 0,002%. Disimpulkan bahwa spektrum hidrogen berperan sebagai kunci empiris yang memaksa fisika memasukkan kuantisasi ke dalam struktur atom, meskipun model Bohr kemudian digantikan oleh mekanika kuantum.

Kata Kunci: spektrum atom hidrogen; model atom Bohr; deret Balmer

PENDAHULUAN

Pertanyaan tentang penyusun materi telah lama menjadi pusat perhatian ilmu pengetahuan, tetapi pertanyaan tentang struktur atom baru dapat dijawab secara empiris setelah penemuan elektron oleh J. J. Thomson pada akhir abad ke-19. Model atom Thomson, yang dikenal sebagai model “roti kismis” (plum pudding), menggambarkan atom sebagai bola bermuatan positif yang homogen dengan elektron-elektron tertanam di dalamnya (Thomson, 1904). Dalam model ini elektron dapat bergetar di sekitar posisi setimbangnya sehingga secara prinsip dapat memancarkan radiasi, tetapi spektrum yang diprediksikan tidak menyerupai pola garis yang teratur dan tajam seperti yang diamati dalam spektroskopi. Hamburan partikel α pada lembaran emas tipis yang dilakukan oleh Geiger dan Marsden (1909) kemudian menunjukkan adanya hamburan sudut besar, yang tidak dapat diterima oleh model Thomson. Rutherford (1911) menafsirkan hasil ini sebagai bukti bahwa muatan positif dan hampir seluruh massa atom terpusat pada inti yang sangat kecil.

Model Rutherford memberikan gambaran yang menarik secara fisis, tetapi menimbulkan dilema serius. Elektron yang mengorbit inti mengalami percepatan sentripetal, dan menurut elektrodinamika Maxwell, muatan yang dipercepat memancarkan radiasi elektromagnetik (Jackson, 1999). Kehilangan energi ini menyebabkan orbit mengecil secara spiral dan atom runtuh dalam waktu yang sangat singkat. Lebih jauh, frekuensi radiasi yang dipancarkan selama proses ini berubah secara kontinu sehingga spektrum yang diprediksikan bersifat kontinu, bertentangan dengan fakta eksperimen bahwa gas hidrogen yang tereksitasi hanya memancarkan garis-garis cahaya pada panjang gelombang tertentu (Balmer, 1885; Rydberg, 1890). Kontradiksi ini bukan sekadar kekurangan teknis, melainkan krisis konseptual yang menandai batas validitas fisika klasik pada skala atomik (Kragh, 2012; Pais, 1991).

Niels Bohr, yang pada 1912 bekerja di laboratorium Rutherford di Manchester, menyadari bahwa konstanta Planck h merupakan satu-satunya besaran yang dapat memperkenalkan skala panjang dan energi yang cocok dengan ukuran atom. Rumus Balmer yang sederhana dan akurat memberi petunjuk empiris yang menentukan: bila frekuensi garis spektrum dapat ditulis sebagai selisih dua “suku” yang masing-masing berbanding terbalik dengan kuadrat bilangan bulat, maka suku-suku tersebut dapat ditafsirkan sebagai tingkat energi atom yang terkuantisasi (Heilbron & Kuhn, 1969; Kragh, 2012). Hasilnya, dalam trilogi makalah 1913, Bohr merumuskan model atom yang secara kuantitatif mampu menurunkan rumus Balmer–Rydberg dan nilai konstanta Rydberg dari konstanta-konstanta fundamental (Bohr, 1913a, 1913b).

Meskipun model Bohr secara historis telah digantikan oleh mekanika kuantum Heisenberg



dan Schrödinger (Heisenberg, 1925; Schrödinger, 1926), model ini masih menjadi bagian inti kurikulum fisika modern dan kimia umum di seluruh dunia. Penelitian pendidikan sains menunjukkan bahwa mahasiswa umumnya paling nyaman dengan gambaran Bohr tentang atom, dan bahwa pemahaman terhadap alasan historis munculnya suatu model lebih sulit dicapai daripada pemahaman terhadap ciri-ciri model itu sendiri (McKagan et al., 2008; Echeverri-Jimenez & Balabanoff, 2026). Kajian terbaru juga menegaskan nilai pedagogis pendekatan berbasis data spektrum, misalnya melalui pembelajaran inkuiri terpandu di mana peserta didik membangun diagram tingkat energi hidrogen dari pengukuran deret Balmer (Singleton et al., 2022). Di sisi lain, kajian-kajian fisika mutakhir tetap memandang hidrogen sebagai laboratorium utama uji elektrodinamika kuantum dan penentuan konstanta fundamental (Brandt et al., 2022; Mohr et al., 2025), sedangkan analisis dimensional modern kembali menyoroti struktur model Bohr sebagai jalan masuk menuju konstanta Planck (Glampedakis, 2026).

Banyak bahan ajar menyajikan model Bohr hanya sebagai kumpulan rumus dan postulat yang siap pakai, sehingga hubungan logis antara data spektrum dan konstruksi teori sering terlewat. Akibatnya, peserta didik cenderung menghafal $E_n = -13,6/n^2$ tanpa memahami bahwa rumus tersebut lahir dari kebutuhan menjelaskan pola empiris. Kajian yang menelusuri secara sistematis jalur penalaran dari data spektrum menuju postulat, penurunan matematis, dan verifikasi numerik karenanya penting, baik bagi pemahaman historis-epistemologis maupun bagi praktik pembelajaran fisika.

Penelitian ini bertujuan untuk (1) menganalisis keterbatasan model atom pendahulu terhadap spektrum diskrit; (2) mendeskripsikan karakteristik spektrum hidrogen dan rumus empirisnya; (3) merekonstruksi secara konseptual dan matematis hubungan antara spektrum hidrogen dan postulat Bohr; serta (4) mengevaluasi kesesuaian kuantitatif model Bohr dengan data eksperimen.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dengan jenis kajian pustaka (library research) bercorak historis-konseptual. Data dikumpulkan melalui studi dokumen terhadap makalah asli yang memuat temuan dan gagasan kunci: Balmer (1885), Rydberg (1890), Ritz (1908), Paschen (1908), Brackett (1922), Pfund (1924), Thomson (1904), Rutherford (1911), Geiger dan Marsden (1909), serta trilogi Bohr (1913a, 1913b).

Analisis dilakukan dengan analisis isi (content analysis) kualitatif-deskriptif (Krippendorff, 2019) melalui empat tahap: (1) unitisasi, yaitu pemilahan dokumen menjadi unit makna (pernyataan empiris, asumsi teoretis, turunan matematis); (2) pengodean ke dalam kategori yang ditetapkan secara deduktif dari rumusan masalah; (3) kategorisasi dan sintesis untuk menghubungkan data empiris dengan unsurunsur teori; serta (4) penarikan simpulan disertai verifikasi silang antarsumber (triangulasi sumber). Skema pengodean disajikan pada Tabel 1. Untuk mengecek konsistensi kuantitatif, seluruh penurunan matematis dalam kajian ini dihitung ulang secara numerik menggunakan nilai konstanta rekomendasi CODATA 2022 (Mohr et al., 2025), kemudian dibandingkan dengan nilai panjang gelombang garis Balmer yang lazim dipublikasikan (lihat juga Kramida et al., 2024).


Tabel 1. Skema Pengodean Analisis Isi

Kategori	Unit analisis	Rumusan masalah
K1. Keterbatasan klasik	Argumen radiasi Larmor, spektrum kontinu, hamburan sudut besar	RM 1
K2. Regularitas empiris	Panjang gelombang garis, rumus Balmer–Rydberg, prinsip kombinasi Ritz, deret spektral	RM 2
K3. Konstruksi postulat	Orbit stasioner, kuantisasi L , frekuensi Bohr, prinsip korespondensi	RM 3
K4. Derivasi matematis	Jari-jari r_n , energi E_n , tetapan Rydberg teoretis	RM 3
K5. Validasi eksperimen	Perbandingan λ_{teori} dan λ_{eksp} , efek massa tereduksi	RM 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Keterbatasan Model Atom Pendahulu dalam Menjelaskan Spektrum Diskrit

Dalam model Thomson, elektron bergerak dalam bola muatan positif bermuatan seragam. Gaya pada elektron di dalam bola adalah gaya pemulih harmonik, $F = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R^3}r$, sehingga elektron berosilasi dengan frekuensi tunggal $\omega_0 = \sqrt{e^2 / (4\pi\epsilon_0 m_e R^3)}$ untuk atom berjari-jari R . Penerapan nilai $R \sim 10^{-10}$ m memberikan frekuensi di daerah ultraviolet, tetapi model ini tidak memiliki mekanisme alami untuk menghasilkan banyak garis dengan pola numerik yang teratur. Lebih mendasar lagi, model ini bertentangan dengan hamburan sudut besar partikel α : bila muatan positif tersebar merata, medan listrik maksimum di dalam atom terlalu lemah untuk membelokkan partikel α yang berenergi beberapa MeV hingga sudut yang besar dalam satu tumbukan, dan peluang pembelokan akibat akumulasi banyak tumbukan kecil terlalu rendah (Geiger & Marsden, 1909; Rutherford, 1911).

Rutherford (1911) menafsirkan data hamburan sebagai konsekuensi gaya Coulomb dari inti yang terpusat. Untuk elektron bermassa m_e yang mengorbit lingkaran berjari-jari r mengelilingi inti bermuatan $+e$, kesetimbangan gaya Coulomb dan gaya sentripetal memberikan

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \quad (1)$$

Sehingga energi total

$$E = \frac{1}{2} m_e v^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (2)$$

Pada model klasik, r dapat bernilai sembarang sehingga energi atom dapat bernilai kontinu. Elektron dalam orbit ini mengalami percepatan $a = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e r^2}$. Menurut rumus Larmor, daya radiasi muatan yang dipercepat adalah

$$P = \frac{e^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \quad (3)$$

Dengan prinsip kekekalan energi, laju penurunan energi orbit harus sama dengan daya radiasi, $\frac{dE}{dt} = -P$. Dari Persamaan (2) diperoleh $\frac{dE}{dt} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r^2} \frac{dr}{dt}$, sehingga



$$\frac{dr}{dt} = -\frac{e^4}{12\pi^2\epsilon_0^2 m_e^3 c^3} \frac{1}{r^2} \quad (4)$$

Integrasi dari $r = r_0$ hingga $r = 0$ memberikan waktu keruntuhan

$$t_{\text{runtuh}} = \frac{4\pi^2\epsilon_0^2 m_e^3 c^3 r_0^3}{e^4} = \frac{r_0^3}{4r_e^2 c}, \quad r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} \quad (5)$$

Dengan $r_e \approx 2,82 \times 10^{-15}$ m adalah jari-jari klasik elektron. Untuk $r_0 \approx 5,29 \times 10^{-11}$ m, diperoleh

$$t_{\text{runtuh}} \approx \frac{(5,29 \times 10^{-11})^3}{4 (2,82 \times 10^{-15})^2 (3,00 \times 10^8)} \approx 1,6 \times 10^{-11} \text{ s}. \quad (6)$$

Dengan demikian, atom Rutherford seharusnya runtuh dalam sekitar sepuluh pikodetik, kontras dengan kenyataan bahwa atom hidrogen stabil tanpa batas waktu dalam keadaan dasarnya.

Persoalan kedua menyangkut spektrum. Frekuensi orbital elektron adalah $f = v/(2\pi r)$ dan, dari Persamaan (1), $f \propto r^{-3/2}$. Karena r menyusut secara kontinu selama proses spiral, f meningkat secara kontinu dan radiasi yang dipancarkan mencakup seluruh frekuensi dalam rentang tertentu—spektrum kontinu. Prediksi ini bertentangan langsung dengan spektrum garis yang diamati. Kedua kontradiksi (kestabilan dan spektrum diskrit) menunjukkan bahwa penerapan fisika klasik pada dinamika elektron atomik harus dibatasi oleh prinsip baru; Bohr secara eksplisit mengakui ketidakcukupan elektrodinamika klasik untuk sistem berukuran atom (Bohr, 1913a).

Karakteristik Spektrum Emisi Atom Hidrogen

Spektrum emisi hidrogen yang dihasilkan oleh tabung pelepasan gas berupa sejumlah garis terang pada panjang gelombang tertentu, bukan pita kontinu. Di daerah cahaya tampak, empat garis yang paling mudah diamati adalah $H\alpha$ (merah), $H\beta$ (biru-hijau), $H\gamma$ (biru-ungu), dan $H\delta$ (ungu). Balmer (1885) menemukan bahwa panjang gelombang garis-garis tersebut dapat dihasilkan oleh rumus

$$\lambda = B \frac{m^2}{m^2 - 4}, \quad m = 3, 4, 5, \dots \quad (7)$$

Dengan $B \approx 364,56$ nm. Rumus ini sangat akurat dan, yang lebih penting, meramalkan garis-garis tambahan pada $m > 6$ yang kemudian terbukti ada. Keberhasilan ini menunjukkan bahwa spektrum atom tidak acak, melainkan mengikuti hukum aritmetika sederhana.

Rydberg (1890) menyusun rumus yang lebih umum dengan bekerja pada bilangan gelombang $\tilde{\nu} = 1/\lambda$ daripada panjang gelombang. Untuk hidrogen,

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad n_2 > n_1, \quad n_1, n_2 \in \mathbb{Z}^+, \quad (8)$$

Dengan $R_H \approx 1,0968 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$. Persamaan (8) mencakup rumus Balmer sebagai kasus $n_1 = 2$, dengan $B = 4/R_H$. Prinsip kombinasi Ritz (1908) menyatakan bahwa bilangan gelombang setiap garis spektrum dapat dinyatakan sebagai selisih dua suku spektral $T(n)$:

$$\tilde{\nu}_{n_1 n_2} = T(n_1) - T(n_2), \quad T(n) = \frac{R_H}{n^2}. \quad (9)$$

Bila $\tilde{\nu}_{n_1 n_2}$ dan $\tilde{\nu}_{n_2 n_3}$ adalah dua garis yang teramati, maka $\tilde{\nu}_{n_1 n_2} + \tilde{\nu}_{n_2 n_3} = \tilde{\nu}_{n_1 n_3}$ juga merupakan garis yang mungkin muncul. Struktur aditif inilah yang kemudian dimaknai Bohr secara fisis: setiap suku spektral bersesuaian dengan satu *keadaan* atom, dan setiap garis spektral bersesuaian dengan *transisi* antara dua keadaan (Kragh, 2012).



Pengamatan lanjutan memperluas jangkauan spektrum ke wilayah ultraviolet dan inframerah, dan semuanya sesuai dengan Persamaan (8) dengan nilai n_1 berbeda. Deret Lyman ($n_1 = 1$) berada di daerah ultraviolet, deret Balmer ($n_1 = 2$) sebagian besar di daerah tampak, serta deret Paschen ($n_1 = 3$), Brackett ($n_1 = 4$), dan Pfund ($n_1 = 5$) berada di daerah inframerah (Paschen, 1908; Brackett, 1922; Pfund, 1924; Beiser, 2003). Batas deret (series limit), yaitu panjang gelombang untuk $n_2 \rightarrow \infty$, dinyatakan oleh

$$\lambda_{\infty} = \frac{n_1^2}{R_H} \quad (10)$$

Menandai kondisi ionisasi: konvergensi garis-garis ke batas ini menunjukkan bahwa di atas suatu energi tertentu elektron tidak lagi terikat. Hasil perhitungan numerik untuk lima deret pertama disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2: Parameter deret spektral atom hidrogen (dihitung dari Persamaan (8) dengan $R_H = 1,096776 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$; panjang gelombang dalam vakum)

Deret	n_1	n_2	λ garis pertama (nm)	λ_{∞} (nm)	Daerah	Penemuan
Lyman	1	≥ 2	121,57	91,18	Ultraviolet	Lyman (1906–
Balmer	2	≥ 3	656,47	364,71	Tampak/UV dekat	Balmer (1885)
Paschen	3	≥ 4	1875,6	820,6	Inframerah dekat	Paschen (1908)
Brackett	4	≥ 5	4052,3	1458,8	Inframerah	Brackett (1922)
Pfund	5	≥ 6	7459,9	2279,4	Inframerah jauh	Pfund (1924)

Beberapa karakteristik kualitatif penting dapat disimpulkan dari data ini. Pertama, jarak antargaris dalam setiap deret mengecil dan garis-garis menumpuk menuju batas deret; hal ini sesuai dengan sifat tingkat energi $\propto n^{-2}$ yang menumpuk menuju nol. Kedua, seluruh deret berbagi satu konstanta R_H , sehingga satu tetapan universal mengikat seluruh spektrum. Ketiga, garis terpanjang dalam deret berikutnya selalu berada di atas batas deret sebelumnya, yang mengisyaratkan struktur bertingkat dari satu himpunan keadaan. Ketiga ciri ini menjadi petunjuk empiris yang secara langsung “meminta” tafsir berupa tingkat energi terkuantisasi.

Konstruksi Postulat Niels Bohr

Dalam makalah pertamanya, Bohr (1913a) bertolak dari dua premis yang tampaknya tak dapat didamaikan: model inti Rutherford yang didukung bukti hamburan, dan spektrum garis yang menuntut kuantisasi. Menurut rekonstruksi historis, rumus Balmer memegang peran penentu dalam proses ini: Bohr menyadari bahwa bentuk $R_H \left(1/n_1^2 - 1/n_2^2 \right)$, bila dikalikan hc , memberikan energi foton sebagai selisih dua besaran yang masing-masing berbentuk $-hcR_H/n^2$ (Heilbron & Kuhn, 1969; Kragh, 2012; Kragh, 2022). Besaran-besaran ini dapat ditafsirkan sebagai energi ikat atom pada keadaan ke- n . Penafsiran tersebut memaksa dua lompatan konseptual: keadaan atom tidak kontinu, dan emisi bukan proses kontinu melainkan transisi.

Gagasan di atas dirumuskan Bohr dalam postulat-postulat berikut (disajikan dalam bentuk yang lazim dalam buku teks modern, misalnya Beiser, 2003; Krane, 2012):

Postulat 1. Orbit stasioner. Elektron dalam atom hanya dapat berada pada lintasan lingkaran tertentu di sekeliling inti yang disebut keadaan stasioner. Dalam keadaan ini, elektron tidak memancarkan radiasi meskipun mengalami percepatan, dan gerakannya diatur oleh mekanika klasik (hukum Coulomb dan hukum Newton).



Postulat 2. Kuantisasi momentum sudut. Keadaan stasioner yang diperbolehkan adalah yang memenuhi

$$L = m_e v r = n \hbar = n \frac{h}{2\pi}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

Postulat 3. Frekuensi Bohr. Radiasi dipancarkan atau diserap hanya ketika atom bertransisi antara dua keadaan stasioner, dengan energi foton

$$h\nu = E_{n_2} - E_{n_1} \quad (12)$$

Perlu dicatat bahwa Bohr (1913a) sendiri tidak menyatakan Persamaan (11) dalam bentuk $L = n\hbar$ pada awalnya. Ia mula-mula menggunakan syarat bahwa energi kinetik elektron sama dengan $\frac{1}{2}nhf_{\text{orb}}$, dan baru kemudian menunjukkan kesetaraannya dengan kuantisasi momentum sudut. Kesetaraan ini dapat dilihat dengan mudah: untuk orbit lingkaran, $T = \frac{1}{2}m_e v^2 = \frac{1}{2}m_e v r \cdot \frac{v}{r} = \frac{1}{2}L \cdot (2\pi f_{\text{orb}}) = \pi L f_{\text{orb}}$, sehingga $T = \frac{1}{2}nhf_{\text{orb}}$ setara dengan $L = nh/2\pi$. Kajian historis menegaskan bahwa Bohr memasukkan "kuantum aksi" dengan memanfaatkan ide Planck (1901) dan Einstein (1905) pada sistem mekanik, tetapi tetap mempertahankan gambaran lintasan klasik (Jammer, 1966; Pais, 1991).

Selain ketiga postulat, Bohr menggunakan argumen korespondensi untuk menentukan konstanta proporsionalitas dalam kuantisasi energi. Gagasannya adalah bahwa untuk bilangan kuantum n yang sangat besar, frekuensi radiasi hasil transisi antara orbit berdekatan harus mendekati frekuensi orbital klasik, sehingga hasil klasik terpulihkan dalam batas tersebut. Tinjauan terbaru terhadap konstruksi model Bohr menyoroti bahwa penerapan prinsip ini bersama beberapa asumsi tersembunyi lain (misalnya, orbit lingkaran dan massa inti tak hingga) merupakan bagian tak terpisahkan dari model dan menjelaskan mengapa struktur halus tidak tercakup (Glampedakis, 2026; Kragh, 2022).

Penurunan Matematis Jari-Jari Orbit dan Tingkat Energi

Dari Persamaan (1), kecepatan elektron pada jari-jari r adalah

$$v^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e r}. \quad (13)$$

Dari Persamaan (11), $v = \frac{n\hbar}{m_e r}$, sehingga $v^2 = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e^2 r^2}$. Menyamakan kedua ungkapan untuk v^2 :

$$\frac{n^2 \hbar^2}{m_e^2 r^2} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e r} \Rightarrow r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} n^2 = a_0 n^2, \quad (14)$$

dengan jari-jari Bohr

$$a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} = \frac{\hbar}{m_e c \alpha} \approx 5,2918 \times 10^{-11} \text{ m}, \quad (15)$$

dan $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137,036}$ adalah tetapan struktur halus. Kecepatan elektron pada keadaan ke- n diperoleh dari $v_n = n\hbar/(m_e r_n)$:



$$v_n = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar n} = \frac{\alpha c}{n}, \quad (16)$$

Sehingga pada keadaan dasar $v_1 = \alpha c \approx 2,19 \times 10^6$ m/s ($\approx 0,73\%$ kecepatan cahaya), yang membenarkan perlakuan nonrelativistik sebagai pendekatan awal.

Substitusi r_n ke Persamaan (2) memberikan

$$E_n = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{m_e e^4}{2(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2 n^2} = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}. \quad (17)$$

Dalam bentuk yang lebih ringkas, dengan α ,

$$E_n = -\frac{1}{2} m_e c^2 \frac{\alpha^2}{n^2} = -\frac{13,6057 \text{ eV}}{n^2}. \quad (18)$$

Keadaan dasar ($n = 1$) memiliki energi $E_1 \approx -13,6$ eV; dengan demikian energi ionisasi hidrogen sama dengan 13,6 eV. Selisih energi antartingkat menjadi lebih kecil seiring n bertambah, dan $E_n \rightarrow 0$ untuk $n \rightarrow \infty$. Hubungan antara energi kinetik, energi potensial, dan energi total memenuhi teorema virial untuk gaya $\propto r^{-2}$: $T_n = -E_n$ dan $U_n = 2E_n$.

Hasil numerik untuk lima keadaan pertama dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3: Parameter orbit Bohr atom hidrogen untuk $n = 1$ hingga 5 (nilai dihitung dengan konstanta CODATA 2022, massa inti dianggap tak hingga)

n	r_n (nm)	r_n	v_n	E_n (eV)	Periode
1	0,05292	1	$7,297 \times$	-13,606	$1,52 \times$
2	0,2117	4	$3,649 \times$	-3,401	$1,22 \times$
3	0,4763	9	$2,432 \times$	-1,512	$4,10 \times$
4	0,8467	16	$1,824 \times$	-0,850	$9,73 \times$
5	1,3229	25	$1,459 \times 10^{-3}$	-0,544	$1,90 \times 10^{-14}$

Kesesuaian Teoretis Model Bohr dengan Data Eksperimen

Tabel 4 membandingkan panjang gelombang teoretis lima garis Balmer pertama dengan nilai eksperimen. Nilai teoretis dihitung dari Persamaan (8) dengan RH dari Persamaan (21) sebagai panjang gelombang dalam vakum, kemudian dikonversi ke panjang gelombang dalam udara standar menggunakan formula indeks bias Edlén, karena nilai eksperimen yang lazim dilaporkan untuk garis tampak diukur di udara. Perbandingan acuan dengan data standar mengacu pada basis data spektrum atom (Kramida et al., 2024) dan nilai tabular yang dilaporkan dalam literatur pendidikan (Singleton et al., 2022; Beiser, 2003).

Tabel 4 memperlihatkan dua temuan. Pertama, bila massa inti dianggap tak hingga (R_∞), prediksi menyimpang sekitar $-0,05\%$ secara sistematis, yaitu sekitar 0,3 nm pada $H\alpha$. Penyimpangan ini kecil, tetapi jauh di atas presisi pengukuran spektroskopi dan konsisten di seluruh garis, yang merupakan ciri kesalahan sistematis, bukan acak. Kedua, setelah koreksi massa tereduksi, selisih turun menjadi kurang dari 0,002% untuk kelima garis. Dengan kata lain, satu konstanta (RH) yang diturunkan dari konstanta fundamental mereproduksi lima garis berbeda dengan ketepatan beberapa bagian per seratus ribu. Kecocokan ini diperoleh tanpa parameter bebas, yang menjadikannya bukti yang jauh lebih kuat dibandingkan pencocokan kurva empiris.

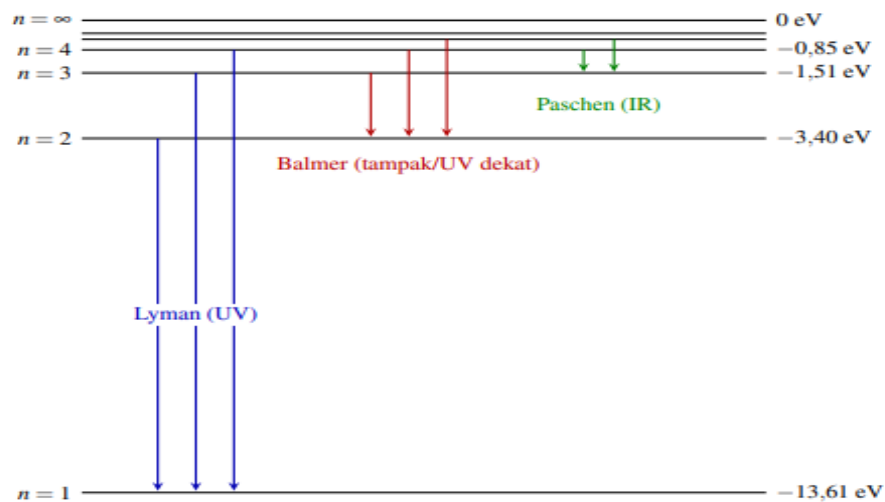


Tabel 4. Perbandingan panjang gelombang teoretis (model Bohr) dan eksperimen untuk deret Balmer. Selisih relatif dihitung terhadap nilai eksperimen di udara

Garis	$n_2 \rightarrow 2$	λ_{vak} (nm), R_H	λ_{udara} (nm), R_H	λ_{eksp} (nm)	Selisih (R_H)	Selisih (R_∞)	E_{foton} (eV)
H α	$3 \rightarrow 2$	656,470	656,288	656,28	+0,0013 %	−0,053 %	1,889
H β	$4 \rightarrow 2$	486,274	486,138	486,13	+0,0016 %	−0,053 %	2,550
H γ	$5 \rightarrow 2$	434,173	434,051	434,05	+0,0002 %	−0,054 %	2,856
H δ	$6 \rightarrow 2$	410,294	410,178	410,17	+0,0019 %	−0,053 %	3,022
H ϵ	$7 \rightarrow 2$	397,124	397,011	397,01	+0,0003 %	−0,054 %	3,122

Diagram tingkat energi pada Gambar 1 menyatukan seluruh deret spektral dalam satu skema: setiap deret berkorespondensi dengan kelompok transisi yang berakhir pada tingkat bawah yang sama. Struktur ini menjelaskan mengapa deret Balmer, Lyman, dan Paschen memiliki konstanta R yang sama, tetapi terletak pada daerah spektrum yang berbeda, dan sekaligus menunjukkan bahwa prinsip kombinasi Ritz bukan sekadar keanehan numerik melainkan konsekuensi kuantisasi.

Gambar 1. Skema tingkat energi atom hidrogen model Bohr dan asal-usul deret spektral. Skala energi vertikal tidak linear (dipetakan agar tingkat-tingkat atas dapat dibedakan). Panah menunjukkan transisi emisi; deret Brackett dan Pfund (inframerah) tidak digambar.



Analisis isi terhadap sumber-sumber primer dan sekunder memperlihatkan beberapa peran spektrum hidrogen dalam pembentukan model Bohr.

(1) Spektrum sebagai sumber pola (bukan hanya data). Rumus Balmer–Rydberg memberi pola aritmetika yang menyaring ruang kemungkinan teori: setiap model atom yang valid harus menghasilkan suku $\propto n^{-2}$. Model Thomson tidak memiliki mekanisme seperti itu, sedangkan model Rutherford memiliki dinamika $1/r$ yang kompatibel dengan energi $\propto 1/n^2$ jika $r \propto n^2$. Kecocokan inilah yang membuat kuantisasi $r_n = a_0 n^2$ tampak “wajar” bagi Bohr (Heilbron & Kuhn, 1969).

(2) Spektrum sebagai kalibrasi konstanta. Karena R_∞ dapat diukur dengan presisi tinggi, nilai ini menjadi alat uji untuk konstanta h , e , dan m_e . Dalam praktik modern, spektroskopi presisi hidrogen, misalnya pengukuran transisi $2S_{1/2} \rightarrow 8D_{5/2}$ dengan ketidakpastian relatif orde 10^{-12} , digunakan untuk menentukan R_∞ dan jari-jari muatan proton (Brandt et al., 2022; Mohr et al.,



2025). Hidrogen karenanya tetap berfungsi sebagai sistem uji utama, meskipun dengan teori yang jauh lebih halus daripada Bohr.

(3) Spektrum sebagai pembeda antar-model. Spektrum menyediakan kriteria diskriminatif yang jelas: model Rutherford klasik menghasilkan spektrum kontinu dan atom tidak stabil; model Bohr menghasilkan garis diskrit dan atom stabil. Dengan perbandingan ini, seleksi teori berlangsung berdasarkan bukti empiris kuantitatif, sejalan dengan pandangan bahwa kemajuan fisika sering terjadi ketika pola data yang anomali memaksa revisi prinsip (Kragh, 2012).

(4) Peran sekunder eksperimen lain. Spektrum bukan satu-satunya dukungan empiris. Eksperimen Franck dan Hertz (1914) menunjukkan secara independen bahwa elektron kehilangan energi pada tumbukan hanya dalam paket-paket diskrit pada atom raksa, yang mendukung gagasan tingkat energi atom. Meski demikian, secara historis spektrum hidrogen yang pertama kali memberikan pola kuantitatif, sedangkan eksperimen Franck–Hertz kemudian menjadi konfirmasi tambahan.

Keterbatasan Model Bohr dan Transisi ke Mekanika Kuantum

Meskipun berhasil, model Bohr memiliki keterbatasan yang kemudian terbukti fatal. Model ini (a) hanya berlaku untuk sistem satu elektron; (b) tidak dapat menjelaskan intensitas relatif garis dan aturan seleksi; (c) tidak mereproduksi struktur halus (yang diperluas oleh Sommerfeld, 1916, dengan orbit elips dan koreksi relativistik, tetapi tetap bersifat semiklasik); (d) menggambarkan momentum sudut keadaan dasar sebesar $\hbar$, padahal pengukuran kuantum menunjukkan nol untuk keadaan 1s; dan (e) mempertahankan konsep lintasan yang tidak kompatibel dengan prinsip ketidakpastian. Mekanika matriks (Heisenberg, 1925) dan mekanika gelombang (Schrödinger, 1926) menyelesaikan persoalan ini; penyelesaian persamaan Schrödinger untuk potensial Coulomb menghasilkan tingkat energi yang sama dengan Persamaan (17) tetapi dengan bilangan kuantum utama n , orbital l , dan magnetik m_l , serta fungsi gelombang yang menggantikan lintasan (Griffiths & Schroeter, 2018; Sakurai & Napolitano, 2021).

Bahwa tingkat energi Bohr bertahan dalam teori kuantum lengkap menunjukkan bahwa model tersebut menangkap sesuatu yang benar tentang struktur energi, bukan tentang struktur ruang. Hal ini penting dari sisi pendidikan: temuan pendidikan sains menunjukkan bahwa peserta didik sering mempertahankan gambaran orbit planeter bahkan setelah mempelajari model kuantum, kecuali kurikulum secara eksplisit membandingkan beberapa model dan membahas alasan historis pergantiannya (McKagan et al., 2008; Echeverri-Jimenez & Balabanoff, 2026). Dengan memosisikan spektrum hidrogen sebagai “jembatan” epistemik, pembelajaran dapat menunjukkan bahwa model Bohr adalah langkah penting yang dibenarkan oleh data, sekaligus model yang terbatas dan sengaja diganti.

Implikasi bagi Pembelajaran Fisika

Dari sudut pandang pendidikan sains, hasil kajian ini menyiratkan tiga rekomendasi. Pertama, rumusan Rydberg sebaiknya disajikan lebih dahulu sebagai data yang membutuhkan penjelasan, kemudian model Bohr diperkenalkan sebagai jawaban, bukan sebaliknya; urutan ini selaras dengan pendekatan inkuiri terpandu yang telah diuji di berbagai institusi (Singleton et al., 2022). Kedua, perbandingan eksplisit antara hasil klasik (keruntuhan dalam 10^{-11} s dan spektrum kontinu) dan hasil Bohr memberi peserta didik alasan kuantitatif untuk menerima postulat yang



“tidak intuitif”. Ketiga, pembahasan keterbatasan model Bohr dan transisinya ke mekanika kuantum perlu dimasukkan agar peserta didik tidak mengidentifikasi atom dengan “tata surya mini”, sejalan dengan temuan bahwa banyak peserta didik mencampuradukkan ciri-ciri beberapa model atom (Echeverri-Jimenez & Balabanoff, 2026; McKagan et al., 2008). Sebagai catatan, penelitian ini bersifat studi pustaka; efektivitas rekomendasi pedagogis ini perlu diuji lebih lanjut melalui penelitian empiris di kelas.

KESIMPULAN

Kesimpulan dalam penelitian ini adalah :

Pertama, model Thomson dan Rutherford gagal menjelaskan spektrum diskrit dan kestabilan atom. Pada model Rutherford, elektrodinamika klasik memprediksi waktu keruntuhan sekitar $1,6 \times 10^{-11}$ s dan spektrum kontinu, yang bertentangan dengan kestabilan atom dan spektrum garis hidrogen.

Kedua, spektrum hidrogen tersusun dalam deret Lyman, Balmer, Paschen, Brackett, dan Pfund, yang seluruhnya dirumuskan oleh $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$ dan dipadukan oleh prinsip kombinasi Ritz. Pola ini mengisyaratkan keberadaan tingkat-tingkat energi diskrit.

Ketiga, Bohr menerjemahkan pola tersebut menjadi tiga postulat: orbit stasioner, kuantisasi momentum sudut $L = n\hbar$, dan frekuensi $h\nu = E_{n_2} - E_{n_1}$. Dari sini diturunkan $r_n = a_0 n^2$, $E_n = -13,6 \text{ eV}/n^2$, dan $R_\infty = m_e e^4 / (8\varepsilon_0^2 h^3 c)$, dengan generalisasi Z^2 untuk ion mirip hidrogen.

Keempat, dengan nilai konstanta CODATA 2022 dan koreksi massa tereduksi, panjang gelombang teoretis lima garis Balmer bersesuaian dengan nilai eksperimen dalam selisih relatif kurang dari 0,002%, sedangkan tanpa koreksi massa tereduksi selisihnya sekitar 0,05%. Kesesuaian ini dicapai tanpa parameter bebas.

Dengan demikian, spektrum atom hidrogen merupakan kunci empiris utama yang memaksa penerimaan kuantisasi dalam struktur atom dan membuka jalan revolusi kuantum awal. Model Bohr kemudian digantikan oleh mekanika kuantum, tetapi tingkat energinya tetap bertahan dan nilai pedagogisnya terus relevan. Penelitian lanjutan dapat berupa (i) kajian empiris efektivitas pembelajaran berbasis data spektrum, dan (ii) kajian historis komparatif terhadap respons komunitas ilmiah awal terhadap model Bohr.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada [nama institusi/program studi] atas dukungan fasilitas akses pustaka, kepada rekan sejawat dan pembimbing yang memberikan masukan kritis pada draf awal naskah ini, serta kepada para pengulas anonim atas saran perbaikannya. Penulis juga berterima kasih kepada pengelola basis data terbuka (NIST, arXiv, dan repositori institusi) yang memudahkan penelusuran sumber.

DAFTAR PUSTAKA

Balmer, J. J. (2021). Notiz über die Spectrallinien des Wasserstoffs. *Annalen der Physik*, 261(5), 80–87.



- Beiser, A. (2023). Concepts of modern physics (6th ed.). McGraw-Hill.
- Bohr, N. (2022a). On the constitution of atoms and molecules. *Philosophical Magazine*, 26(151), 1–25. <https://doi.org/10.1080/14786441308634993>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2021). Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (5th ed.). SAGE Publications.
- Echeverri-Jimenez, E., & Balabanoff, M. (2026). Characterizing epistemic atomic modeling knowledge. *Chemistry Education Research and Practice*, 27(1). <https://doi.org/10.1039/D4RP00360H>
- Einstein, A. (2021). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 322(6), 132–148.
- Fadilah, R., & Wahyuni, S. (2023). Evaluasi Kritis Postulat Bohr terhadap Fenomena Spektrum Atom Berelektron Tunggal. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, 13(2), 201-210.
- Firmansyah, A. (2025). Tinjauan Kualitatif Hubungan Konstanta Rydberg dan Spektrum Hidrogen pada Model Bohr. *Jurnal Fisika Flux*, 22(1). dilihat 15 Februari 2026. <https://ppjp.ulm.ac.id/journals/index.php/jpf/article/view/18902>
- Hidayat, M. F. (2024). *Rekonstruksi Sejarah Sains Model Atom Bohr dalam Buku Ajar Fisika SMA*. (Tesis, Universitas Negeri Malang).
- Hidayatullah, S. (2023). Analisis Deskriptif Kualitatif Pemahaman Konsep Model Atom Bohr dan Spektrum Hidrogen. *Jurnal Pendidikan Sains Indonesia*, 11(2). dilihat 14 Oktober 2025. <https://jurnal.usk.ac.id/JPSI/article/view/28100>
- Kurniawan, D., & Rahmawati, I. (2023). Tinjauan Deskriptif Transisi Elektron dan Spektrum Emisi Atom Hidrogen. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 19(2), 112-118.
- Lestari, P. & Hartono, R. (2023). *Kajian Teoretis Spektrum Atom dan Model Atom Klasik-Modern*. Malang: Universitas Negeri Malang Press.
- Mardiana, E. (2021). *Metodologi Penelitian Deskriptif Kualitatif dalam Pendidikan Sains*. Surabaya: Unesa University Press.
- Mulyani, T., & Suhandi, A. (2022). Rekonstruksi Historis Model Atom Bohr Berdasarkan Analisis Spektrum Emisi Gas Hidrogen. *Jurnal Inovasi Pembelajaran Fisika*, 10(1). dilihat 5 Januari 2026. <https://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/jipf/article/view/31201>
- Nugroho, A. (2021). Kontribusi Fisika Klasik dan Kuantum Awal pada Pembentukan Model Atom Bohr. *Jurnal Berkala Fisika*, 24(3), 89-95.
- Pratama, A. D. & Wibowo, T. (2021). *Pengantar Fisika Kuantum untuk Mahasiswa Sains*. Yogyakarta: Deepublish.
- Pratama, B. (2024). Studi Pustaka Kontribusi Spektrum Cahaya Hidrogen dalam Evolusi Teori Atom Modern. *Jurnal Riset Pendidikan Fisika*, 9(3). dilihat 20 November 2025. <https://journal2.um.ac.id/index.php/jrpf/article/view/41502>
- Pratama, R. A. (2023). *Kajian Historis-Epistemologis Pembentukan Postulat Niels Bohr tentang Atom Hidrogen*. (Tesis, Universitas Gadjah Mada).
- Puspitasari, D. (2021). Analisis Kualitatif Fenomena Spektrum Diskrit Hidrogen pada Model Atom Niels Bohr. *Jurnal Tadris Fisika*, 6(2). dilihat 10 Desember 2025. <https://ejournal.radenintan.ac.id/index.php/jtf/article/view/12403>
- Ramadhani, F. (2022). *Analisis Deskriptif Kualitatif Kontribusi Spektrum Atom Hidrogen pada Perkembangan Model Atom Bohr*. (Skripsi, Universitas Pendidikan Indonesia).



- Salsabila, N., & Fauzi, A. (2022). Analisis Kualitatif Model Atom Bohr dalam Menjelaskan Spektrum Garis Hidrogen. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, 18(1), 45-52.
- Santoso, B. (2024). *Fisika Atom: Dari Teori Bohr hingga Mekanika Gelombang*. Jakarta: Kencana Prenada Media.
- Supardi, Y. (2022). *Fisika Modern dan Struktur Atom*. Bandung: Alfabeta.
- Utami, S. W., & Prasetyo, Z. K. (2024). Kajian Literatur Spektrum Hidrogen sebagai Fondasi Awal Lahirnya Teori Kuantum. *Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika*, 13(1), 34-41.
- Wijayanti, S. (2021). *Analisis Kesulitan Belajar Mahasiswa pada Materi Spektrum Emisi Hidrogen dan Model Atom Bohr*. (Skripsi, Universitas Negeri Yogyakarta).
- Zulkarnain, M. (2022). Deskripsi Matematis dan Konseptual Spektrum Atom Hidrogen pada Model Bohr. *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika*, 18(2), 150-158.