

Tinjauan Konseptual Vibrasi Molekul dan Mekanika Klasik Untuk Spektrofotometri Molekuler

Hubertus Ngaderman^{*1}, Ego Srivajawaty Sinaga², Kezia Noviani Anou³

^{1,2,3}Universitas Cenderawasih

Email: ngadermanh@gmail.com

ABSTRACT

The purpose of this study, the first is to review the intermolecular vibrations by looking at the concept of classical mechanics, namely the vibration between two particles connected by a spring. The spring here is defined as a microscopic object that has a spring constant. And the second is that the spring constant k of the molecule is known, the vibrational frequency will be obtained, after that the molecular vibrational energy is obtained. To obtain the molecular vibration spectra, the classical mechanics concept method is used to determine the reduction mass, spring constant k , frequency ν . Quantum mechanics is used to determine the energy of molecular vibration E . From the conceptual method above, we obtain reduction mass quantities and spring constant k , where these quantities are parameters for determining the molecular vibrational energy for hydrogen H_2 and sodium chloride $NaCl$.

Keywords: Two Particle Oscillation; Spring Constant; Molecular Vibration Energy.

ABSTRAK

Tujuan dari penelitian ini, yang pertama adalah meninjau vibrasi antar molekul dengan melihat pada konsep mekanika klasik yaitu getaran antara dua partikel yang dihubungkan dengan pegas. Pegas disini diartikan sebagai sebuah benda mikroskopis yang mempunyai suatu konstanta pegas. Dan yang kedua adalah konstanta k pegas dari molekul tersebut diketahui maka frekuensi getar akan didapat, sesudah itu energi vibrasi molekul diperoleh. Untuk mendapatkan spektra vibrasi molekul maka digunakan metode konsep mekanika klasik untuk menentukan massa reduksi, konstanta pegas k , frekuensi ν . Mekanika kuantum digunakan untuk menentukan energi vibrasi molekul E . Dari metode konsep diatas maka didapatkan besaran-besaran massa reduksi dan konstanta pegas k , dimana besaran-besaran tersebut adalah parameter untuk menentukan energi vibrasi molekul untuk hidrogen H_2 dan natrium klorida $NaCl$.

Kata Kunci: Osilasi Dua Partikel; Konstanta Pegas; Energi Vibrasi Molekul

This is an open-access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



1. Pendahuluan

Spektrometer (spektrograph atau spektroskopi) adalah sebuah instrumen optik yang digunakan untuk mengukur sifat cahaya yang merupakan bagian dari spektrum gelombang elektromagnetik [1]. Analisis spektroskopis bertujuan untuk mengidentifikasi bahan-bahan dengan menggunakan spektrometer. Sebuah spektrometer yang digunakan dalam spektroskopis untuk menghasilkan garis spektrum dan pengukuran dilakukan pada panjang gelombang dan intensitas spektrum tersebut [2].

Spektrometer diaplikasikan pada berbagai panjang gelombang dari sinar gamma sampai pada inframerah. Jika daerah yang menjadi objek pengukuran adalah pada spektrum cahaya tampak maka ilmu yang mempelajari objek pengukuran pada cahaya tampak tersebut adalah

spektrofotometri. Spektroskopi atomik memberikan suatu cara untuk mencirikan berbagai atom dari ciri khas spektrum pancar dan serapnya, Spektroskopi molekuler dapat mencirikan berbagai molekul melalui radiasi yang mereka serap atau pancarkan. Setiap molekul memiliki ciri khas sidik jarinya sendiri yang mudah dikenal. Spektroskopi molekuler dapat memberikan secara pasti komposisi molekul jumlah atom dari setiap jenis, perbandingan isotopik, bahkan pula keadaan ionisasi molekul. Jadi kita dapat membedakan dengan mudah molekul CO dari CO_2 , $H^{35}Cl$ dari $H^{37}Cl$, H_2^+ dari H_2 .

Spektra serap dari atmosfer dapat digunakan untuk mencirikan jumlah berbagai pencemar (pollutant), sehingga dengan spektroskopi molekuler dapat mengukur kemurnian Spektra serap dari debu antar bintang digunakan

untuk mencirikan molekul-molekul yang terdapat dalam ruang antar bintang. Hal ini menjadi satu-satunya teknik yang kita miliki (selama ini) untuk mempelajari pembentukan molekul kompleks dalam galaksi, karena bintang-bintang begitu panasnya sehingga molekul tidak dapat hadir. (Cahaya bintang hanya dapat menampilkan data atom-atom yang berada dalam bahan bintang).

Atmosfer menyerap banyak sekali radiasi inframerah dan gelombang mikro sehingga menyulitkan pencirian spektra berbagai molekul [3]. Tetapi, spektrometer yang ditempatkan pada satelit diluar atmosfer dapat mengamati radiasi-radiasi tersebut sehingga memungkinkan pencirian berbagai jenis molekul, termasuk beberapa molekul organik yang relatif kompleks. Sebagai keuntungan tambahannya, apabila semua spektrometer itu diarahkan ke Bumi, mereka dapat mengukur bagaimana radiasi inframerah yang dipancarkan oleh Bumi diserap dalam atmosfernya, yang dengan demikian melacak kehadiran beraneka-ragam pencemar atmosfer.

Untuk mengkaji struktur molekul paling sederhana, fisikawan menggunakan molekul hydrogen [4]. Molekul hydrogen tersebut bukanlah H_2 melainkan ion molekul hydrogen H_2^+ yang adalah molekul hydrogen yang terionkan satu kali. H_2^+ tersebut adalah konsep mendasar yang menjadi pondasi didalam mempelajari fisika molekul. Konsep dasar tersebut dibangun oleh munculnya Mekanika Kuantum, dimana Mekanika Kuantum banyak menyelesaikan persoalan mikroskopis yang tidak bisa ditangani oleh Mekanika Klasik. Setelah membahas ion

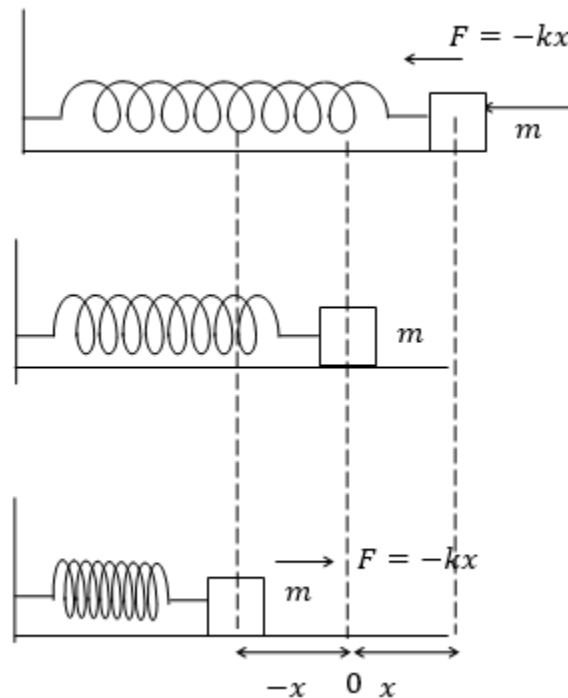
molekul hydrogen kita meningkat ke beberapa molekul sederhana lain yaitu H_2 dan $NaCl$.

Dua atom hydrogen adalah dua atom yang masing-masing memiliki satu proton dan satu electron [5]. Andaikan dua atom hydrogen tersebut terpisah jauh sekali mendekati tak berhingga sehingga interaksi dari kedua elektron yang dimiliki kedua atom hydrogen tersebut dapat diabaikan. Dalam keadaan ini, tiap atom dapat memiliki keadaan orbit $1s$, dengan energi $-13,6eV$ [6]. Sekarang kita mencoba mendekatkan dua atom itu untuk membentuk molekul H_2 , fungsi gelombang kedua elektronnya mulai bertumpang tindih, sehingga kedua elektron dipakai "bersama" oleh kedua atom. Dalam pasal Molekul hydrogen bermuatan positif telah kita lihat bahwa ketumpangtindihan ini terjadi sedemikian rupa sehingga pada daerah diantara kedua proton, kedua fungsi gelombang elektron saling menjumlah yang memberikan molekul stabil, atau saling mengurangi yang memberikan molekul tidak stabil. Keadaan atom yang berdiri sendiri kini berubah menjadi keadaan molekul, dengan orbit elektron molekul beserta bilangan kuantumnya yang bersangkutan [7].

2. Metode Penelitian

Untuk mendapatkan spektra vibrasi molekul dengan menggunakan metode konsep mekanika klasik, yang akan disajikan sebagai berikut:

Konsep Osilasi dua Benda Secara Klasik



Gambar 1. Benda sebagai partikel yang direkatkan pada dinding.

Osilator harmonik sederhana pada Gambar 1 dibentuk oleh sebuah massa m yang dihubungkan dengan sebuah dinding kokoh melalui pegas yang memiliki konstanta gaya k . Dinding diam terpaku pada bumi sehingga sistem ini sesungguhnya merupakan sistem dua benda yang dihubungkan oleh sebuah pegas dengan massa salah satu bendanya dapat dikatakan tak berhingga. Bagian yang kokoh ini tetap diam dalam kerangka acuan inersial sehingga perubahan panjang pegas sama saja dengan simpangan atau pergeseran massa m , ujung pegas yang lain tidak bergerak [8] [9].

Tenaga potensial $U(x)$ sistem yang berosilasi pada Gambar 1 didefinisikan sebagai fungsi simpangan x dari massa m sama saja. Hal inipun setara dengan menganggap bahwa salah satu ujung pegas dihubungkan dengan massa tak berhingga, sehingga pertambahan panjang pegas ditentukan oleh gerak massa m saja.

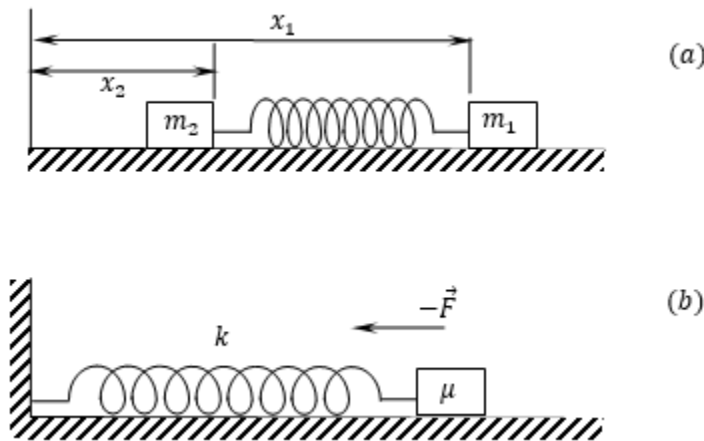
Dalam kehidupan sehari-hari seringkali kita menjumpai sistem berosilasi dua benda dengan massa

salah satu benda tidak dapat diambil sama dengan tak berhingga dan kita harus meninjau gerak kedua benda itu dalam suatu kerangka inersial yang sesuai.

Massa Tereduksi.

Suatu hal yang tak terduga dalam osilator dua benda ini adalah bahwa dengan sedikit mendefinisikan kembali suku-sukunya dan dengan memperkenalkan suatu konsep baru (massa tereduksi), kita dapat menggambarkan osilasi tersebut dengan persamaan yang tepat sama dengan yang diperoleh pada Gambar 1.

Gambar 2(a) menunjukkan dua buah benda m_1 dan m_2 yang dihubungkan oleh sebuah pegas (tak bermassa) dengan konstanta gaya k , sistem bebas berosilasi diatas permukaan horizontal tanpa gesekan. Letak ujung-ujung pegas kita nyatakan dengan koordinat $x_1(t)$ dan $x_2(t)$, seperti yang ditunjukkan dalam gambar.



Gambar 2. Isolasi dua atom dimana massa dua atom tersebut sebagai massa reduksi. Bisa digambarkan sebagai satu massa saja yang direkatkan pad dinding yang rigid [10].

Panjang pegas pada suatu saat adalah $x_1 - x_2$. Dalam keadaan kendur, tanpa tegangan panjangnya adalah l , sehingga perubahan panjang pegas $x(t)$ diberikan oleh

$$x = (x_1 - x_2) - l \tag{1}$$

Jika x positif pegas terentang, jika $x = 0$, pegas dalam keadaan kendur jika x negatif, pegas tertekan.

Gambar 2(a), untuk tegasnya kita anggap bahwa pegas sedang terentang sehingga $x > 0$. Diperlihatkan juga gaya \vec{F} yang dilakukan oleh pegas pada m_2 dan gaya $-\vec{F}$ yang bekerja pada m_1 . Kedua gaya ini sama besar dan berlawanan arah, seperti ditunjukkan dalam gambar dan besarnya adalah $F = kx$.

Jika hukum Newton II, $F = ma$, kita terapkan pada m_1 dan m_2 , kita peroleh

$$m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} = -kx$$

dan

$$m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} = +kx$$

Bila persamaan pertama kita kalikan dengan m_2 dan persamaan kedua kita kalikan dengan m_1 dan kemudian kita kurangkan maka

$$m_1 m_2 \frac{d^2x_1}{dt^2} - m_1 m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} = -m_2 kx$$

yang dapat kita tuliskan sebagai

$$\frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)} \frac{d^2(x_1 - x_2)}{dt^2} = -kx \tag{2}$$

Besaran $m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ memiliki dimensi massa, karena itu kita sebut saja sebagai massa tereduksi (reduced mass) bagi sistem tersebut dan kita beri simbol μ , yaitu

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)} \quad (3)$$

Karena l konstan, maka

$$\frac{d^2(x_1 - x_2)}{dt^2} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

lihat persamaan (1), sehingga persamaan (2) dapat dituliskan kembali sebagai

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{\mu}x = 0 \quad (4)$$

Perhatikan bahwa dari persamaan (3), kita dapat menuliskan

$$\mu = m_1 \frac{m_2}{(m_1 + m_2)} = m_2 \frac{m_1}{(m_1 + m_2)}$$

atau dapat juga

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2},$$

yang berarti bahwa (bila massa berhingga) μ selalu lebih kecil daripada m_1 atau m_2 , itu sebabnya disebut massa tereduksi. Dengan cara yang sama dengan penurunan persamaan (*), persamaan (4) memberikan hasil

$$v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$$

atau

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\mu}{k}} \quad (5)$$

untuk frekuensi dan periode osilasi sistem pada Gambar 2(a). Sistem ini mempunyai frekuensi dan periode yang sama dengan balok tunggal bermassa μ , yang dihubungkan oleh pegas serupa pada dinding kokoh seperti pada Gambar 2(b). Jadi, osilasi dua benda tunggal seperti pada Gambar 2(a) setara dengan osilasi benda tunggal seperti dalam Gambar 2(b). Gerak relatif partikel yang satu terhadap yang lain sama dengan seolah-olah partikel yang lain tetap diam dan massa yang bergerak tereduksi menjadi μ . Konsep massa tereduksi diterapkan secara meluas dalam fisika.

Kita dapat memecahkan persamaan (4) untuk memperoleh hubungan:

$$x = A \cos(\omega t + \phi)$$

$$v = \frac{dx}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \phi),$$

dan

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \phi).$$

Disini x , v dan a menyatakan simpangan, kecepatan dan percepatan relatif antara kedua benda. Jadi,

$$x = (x_1 + x_2) - l.$$

$$v = \frac{dx}{dt} = v_1 - v_2 \quad (6)$$

dan

$$a = \frac{dv}{dt} = a_1 - a_2$$

dengan indeks menunjukkan masing-masing balok.

Tenaga potensial osilator harmonik sederhana dua benda diberikan oleh $U(x) = \frac{1}{2} kx^2$ yang dengan jelas menunjukkan bahwa tenaga potensial ini merupakan karakteristik sistem secara keseluruhan, karena x bergantung kepada posisi kedua benda.

3. Hasil Dan Pembahasan

Hasil dan Pembahasan Mendapatkan Massa Reduksi.

Sebuah molekul dapat menyerap dan memancarkan energi elektromagnet sama seperti pada sebuah atom, sebagai contoh, molekul H_2 dapat menyerap sebuah foton dengan energi yang tepat untuk mengeksitasi salah satu elektron 1s ke suatu keadaan dasar dengan memancarkan sebuah foton. Orde energi foton-foton seperti ini khasnya sama seperti yang dari transisi elektronik dalam atom, 1 hingga 10eV. Transisi optik seperti ini telah dibahas bagi sistem atomik, dan karena transisi optik dalam molekul juga sama, kita tidak akan membahasnya lagi.

Penyerapan atau pemancaran sebuah foton optis mengubah keadaan gerak elektronik dalam sebuah molekul. Bagi beberapa molekul ada beberapa cara untuk menyerap dan memancarkan radiasi elektromagnet. Gerak masing-masing atom dalam molekul dapat pula berubah-ubah, yaitu mereka bervibrasi relatif terhadap yang lain atau berotasi terhadap pusat massa atom. Seperti pada gerak elektronik, gerak vibrasi dan rotasi ini terkuantisasi, energi vibrasi dan energi rotasi hanya dapat dipancarkan atau diserap dalam bentuk kuantum energi tertentu. Dalam bagian ini kita akan membahas cara lain sebuah molekul dapat menyerap atau memancarkan energi elektromagnet dengan mengubah keadaan gerak vibrasi. Gerak vibrasi bergantung pada massa objek yang bervibrasi atau berotasi, dan karena massa elektron sangat kecil maka pengaruhnya tidak berarti.

Untuk mempermudah pembahasannya, kita meninjau saja molekul diatomik, walaupun demikian prinsip umum yang sama berlaku pula pada molekul-molekul lain yang memiliki lebih daripada dua atom. Kita telah mempelajari mekanika gelombang tentang vibrasi dari sebuah osilator harmonik sederhana, dan didapati bahwa, apabila potensialnya diberikan $V = \frac{1}{2} kx^2$, maka tingkat-tingkat energinya adalah

$$E = hv \left(N + \frac{1}{2} \right) \quad (7)$$

$$N = 0, 1, 2, \dots$$

dengan v adalah frekuensi klasik osilator:

$$v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$$

Karena kedua atom molekul bersama-sama bergetar, tidaklah jelas nilai massa manakah yang kita ambil dalam menghitung frekuensi v . Oleh karena itu dengan

menggunakan pers (3) massa reduksi dari metode penelitian maka didapat massa reduksi μ sebagai berikut:

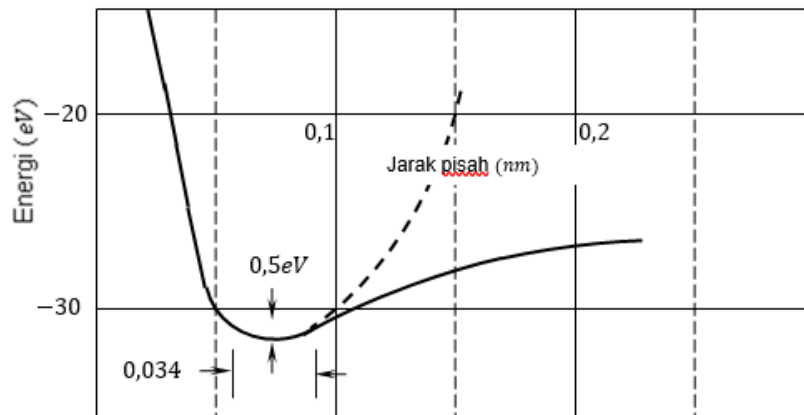
$$\mu = \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)} \quad (8)$$

Jadi, energi sistem sama seperti energi sebuah massa tunggal bermassa m , yang bergerak dengan momentum p . Massa μ ini adalah semacam jumlahan dua massa efektif molekul. Massa inilah yang akan kita gunakan dalam menghitung frekuensi vibrasi.

Perhatikan bahwa $m = \frac{1}{2} m_1$, apabila $m_1 = m_2$, seperti pada molekul berinti sama – massa efektifnya adalah pada separuh massa masing-masing atom. Apabila salah satu massa lebih besar daripada yang lainnya, nilai massa reduksi hampir sama dengan massa yang lebih ringan. Ini sesuai dengan perkiraan kita, karena inersia atau kelembaman massa yang lebih berat memperkecil kecenderungan untuk bergerak, dan sebagian besar gerak vibrasi dilakukan oleh massa yang lebih ringan.

Hasil dan Pembahasan Mendapatkan Nilai k.

Sekarang kita menghitung tetapan k yang muncul dalam pernyataan bagi frekuensi. Cara untuk menghitungnya yaitu kita memperlakukan molekul seolah-olah berperilaku seperti sebuah osilator sederhana. Sebuah osilator yang memiliki $\frac{1}{2} kx^2$ memiliki gaya $F = -kx$ yang menarik massanya menuju pusat. Gaya ini bertambah secara linear terhadap x , tetapi kita tidak memperkirakan hal ini terjadi dalam molekul – gaya ikat molekul semakin lemah begitu jarak antaratomnya diperbesar. Walaupun demikian, energi potensial $\frac{1}{2} kx^2$ dapat diambil sebagai hampiran kasar bagi energi molekul, dalam daerah yang dekat ke kedudukan setimbang. Gambar 3 memperlihatkan energi molekul H_2 , dan kurva parabola $E - E_0 = \frac{1}{2} k(R - R_0)^2$ di sekitar daerah minimumnya.



Gambar 3. Energi kohesif dan atraktif dari dua atom sebagai fungsi dari jarak.

Dapat dilihat bahwa disekitar daerah minimum, parabolanya secara kasar menghampiri energi molekuler sebenarnya. Tetapan k dapat ditaksir dari grafik dengan melihat nilai $R - R_0$ yang diperlukan untuk memberikan suatu energi tertentu $E - E_0$. Seperti diperlihatkan pada gambar, apabila $E - E_0$ sama dengan $0,50eV$, nilai $R - R_0$ adalah sekitar $0,017nm$, dan karena itu kita menaksir bahwa

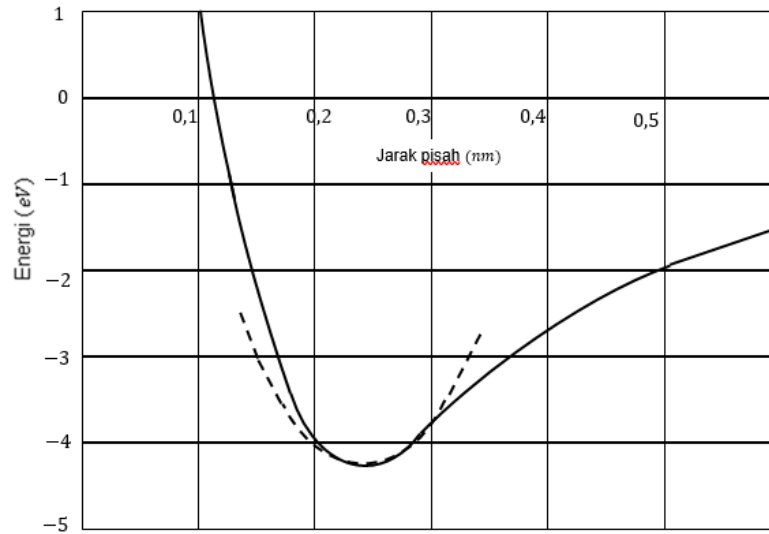
$$k = \frac{2\Delta E}{(\Delta R)^2} = \frac{2 \times 0,5eV}{(0,017nm)^2} = 36 \times 10^{20} eV/m^2$$

Hasil dan Pembahasan Mendapatkan Nilai Spektrum Energi vibrasi molekul.

Karena massa reduksi μ adalah separuh massa atom hidrogen, kita dapat menaksir frekuensi vibrasinya:

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{kc^2}{\mu c^2}} \\ &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(36 \times \frac{10^{20} eV}{m^2})(9 \times \frac{10^{16} m^2}{s^2})}{(0,5)(1,008u)(\frac{931,5 MeV}{u})}} \\ &= 1,3 \times 10^{14} Hz \end{aligned}$$

Frekuensi ini berkaitan dengan kuantum energi vibrasi $h\nu$ sebesar $0,54eV$ dan panjang gelombang $2,3\mu m$, yang adalah dalam daerah inframerah spektrum elektromagnet.



Gambar 4. Pencocokan parabola pada energi minimum

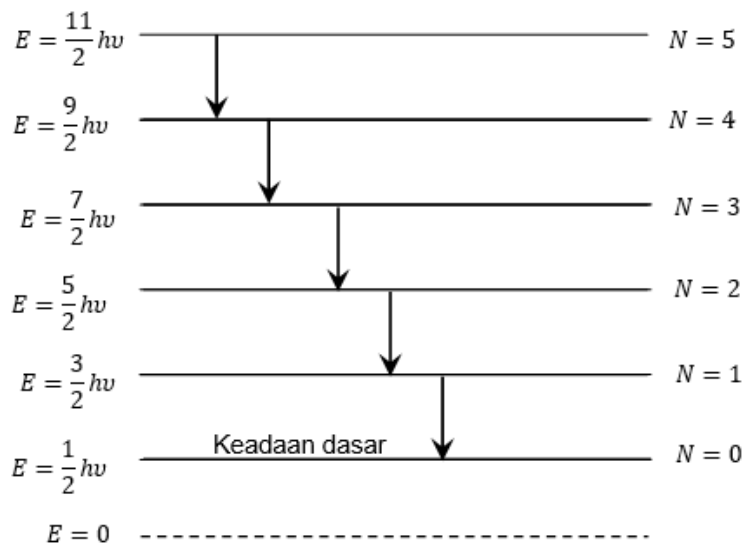
Perhitungan yang sama bagi kasus *NaCl* (lihat Gambar 4) memberikan $\nu = 1,5 \times 10^{13} \text{ Hz}$, $h\nu = 0,063 \text{ eV}$ dan $\lambda = 20 \mu\text{m}$, juga dalam daerah inframerah. Rentang panjang gelombang dalam daerah inframerah, dari sekitar 1 hingga $100 \mu\text{m}$, adalah khas bagi vibrasi molekuler.

Keadaan eksitasi osilator harmonik diberikan oleh rumus $E = h\nu \left(N + \frac{1}{2} \right)$. Jika kita mengeksitasi sebuah molekul dari keadaan dasar vibrasinya ke suatu keadaan eksitasi, maka ia akan balik ke keadaan dasarnya dengan

memancarkan satu buah atau lebih foton yang berkaitan dengan transisi antara tingkat vibrasi yang berbeda. Transisi ini tunduk pada aturan seleksi

$$|\Delta N| = 1$$

Hanya transisi yang mengubah N sebanyak satu unitlah yang dapat terjadi. Beberapa tingkat energi vibrasi dan foton yang diperkenankan diperlihatkan pada Gambar 5, perhatikan bahwa semua transisi memiliki energi sama, $h\nu$.



Gambar 5. Tingkat energi vibrasi dan foton

Tentu saja, jika kita mencapai suatu keadaan eksitasi yang relatif tinggi, kita memperkirakan bahwa parabola tidak lagi memberikan hampiran yang baik bagi energi molekul yang sebenarnya, dan seharusnya kita melihat

perbedaan transisi yang diperkirakan dan yang diamati. (Untuk *NaCl*, Gambar 4 memperlihatkan bahwa parabola merupakan suatu hampiran yang baik bagi kurva energi sebenarnya di sekitar $0,3 \text{ eV}$, dengan taksiran $0,06 \text{ eV}$ bagi

energi vibrasinya, ini berkaitan dengan kira-kira $N = 5$). Di atas keadaan ini, osilator harmonik tidak lagi memerikan secara tepat gerak vibrasi, teristimewa, semua transisi tidak lagi akan memiliki energi yang sama, dan transisi dengan ΔN tidak sama dengan 1 dapat terjadi. Walaupun demikian, model sederhana kita mengenai molekul yang bergetar ini memberikan hasil yang cukup sesuai dengan percobaan.

Sebagai rangkuman dari hasil kajian kita mengenai spektra vibrasi, kita perkirakan banyak transisi tunggal yang akan dipancarkan, semuanya memiliki energi sama, masing-masing berhubungan dengan perubahan satu unit bilangan kuantum vibrasi N , dengan panjang gelombang dalam daerah inframerah spektrum elektromagnet.

4. Kesimpulan

Vibrasi molekul diakibatkan oleh eksitasi dan deeksitasi elektron didalam molekul itu sendiri (atau lebih tepatnya didalam atom didalam (within) molekul). Spektra serap dan pancar akibat vibrasi molekul-molekul dapat diperoleh dengan melihat pada tinjauan klasik mekanika gerak osilasi dua partikel, dan didapat untuk spektra serap dan pancar adalah diskret. Dengan menggunakan massa reduksi maka bisa didapat konstanta k , frekuensi dan energi vibrasi molekul. Eksitasi molekul dari keadaan dasar vibrasinya ke suatu keadaan eksitasi, akan memancarkan foton yang berkaitan dengan transisi antara tingkat vibrasi yang berbeda. Transisi yang mengubah N sebanyak satu unit memiliki energi sama, $h\nu$.

Banyak transisi tunggal yang dipancarkan (didalam spektra pancar), semuanya memiliki energi sama, berhubungan dengan perubahan satu unit bilangan kuantum vibrasi N , dengan panjang gelombang dalam daerah inframerah spektrum elektromagnet. Khusus didalam penelitian ini untuk spektra molekul hidrogen dan natrium klorida $NaCl$ keduanya berada didalam spektrum inframerah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ngaderman, H. (2016). PEMODELAN SPEKTRUM SERAP DAN PANCAR ROTASI MOLEKUL UNTUK MENENTUKAN MOMEN INERSIA DAN MOMENTUM SUDUT ORBITAL. *Photon: Jurnal Sain dan Kesehatan*, 6(02), 45-47.
- [2] Sugito, H., Setia Budi, W., Firdausi, K. S., & Mahmudah, S. (2005). Pengukuran panjang gelombang sumber cahaya berdasarkan pola interferensi celah banyak. *Berkala Fisika*, 8(2), 37-44.
- [3] Supriyadi, B. (2013). Manajemen lingkungan hidup.
- [4] PUTRI, D. K. S. *Probabilitas dan Spektrum Energi Elektron pada Ion Molekul H2 untuk n s-3* (Doctoral dissertation, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan).
- [5] Susdarwono, E. T. (2021). Reaksi Fisi dan Reaksi Fusi dalam Mekanisme Bom Atom dan Senjata Termonuklir. *Vektor: Jurnal Pendidikan IPA*, 2(1), 16-30.
- [6] Yuniarti, E. (2019). Studi Komputasi Sifat Elektronik dan Sifat Optik Fotoelektroda Titanium Dioksida (TiO₂) pada Fasa Anatase dan Rutile. *Al-Fiziya: Journal of Materials Science, Geophysics, Instrumentation and Theoretical Physics*, 2(1), 40-48.
- [7] Hari, B. S. (2019). *Mengenal Fisika Modern*. Penerbit Duta.
- [8] Halliday, 1986, *Fisika Jilid Satu*. Airlangga
- [9] Halliday, 1986, *Fisika Jilid Dua*. Airlangga
- [10] Krane Kenneth S, 1992. *Fisika Modern*. John Wiley and Sons.