

PERHITUNGAN KOEFISIEN TRANSMISI PADA STRUKTUR SUPERLATTICE MENGGUNAKAN METODE PROPAGASI MATRIKS

Russell Ong¹

¹Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Sumatera Utara

Corresponding Email : rsslong@uinsu.ac.id

Abstrak

Efek terobosan merupakan suatu peristiwa dimana partikel dapat menembus potensial penghalang walaupun energi partikel lebih kecil dari nilai potensial penghalang. Peluang suatu elektron untuk menembus potensial penghalang bergantung kepada koefisien transmisi. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki koefisien transmisi pada struktur *superlattice*. Adapun struktur *superlattice* yang dikaji berupa bentukan dari 12 potensial penghalang yang terbagi menjadi dua jenis penghalang (penghalang A dan penghalang B). Jadi, keperiodikan *superlattice* ini ialah keperiodikan dari dua jenis potensial penghalang yang saling berjajaran. Koefisien transmisi dihitung secara numerik menggunakan metode propagasi matriks dengan bantuan perangkat lunak MATLAB R2009a. Variasi nilai potensial penghalang A adalah 5 eV, 10 eV, dan 15 eV, sedangkan variasi nilai potensial penghalang B adalah 5 eV dan 10 eV. Kemudian, konsep massa efektif elektron juga diikutsertakan sekali pada keadaan potensial penghalang A (B) bernilai 5 eV (10 eV). Untuk mengamati *miniband* dan *minigap* dengan jelas, energi elektron divariasikan dari 0 eV—15 eV. Pengecualian pada saat melibatkan konsep massa efektif elektron di mana energi elektron divariasikan dari 0 eV—30 eV. Berdasarkan hasil komputasi numerik, grafik hubungan antara koefisien transmisi dan energi elektron menunjukkan bahwa *minigap* dan *miniband* juga terbentuk pada struktur ini. Lebar *minigap* pertama sampai berikutnya tidak bertambah secara terus-menerus, melainkan berubah secara iterasi dari kecil ke besar dan seterusnya. Ketika konsep massa efektif elektron diperhitungkan, rentang maksimum energi elektron yang diuji harus diset lebih tinggi agar tampak dengan jelas apakah *miniband* dan *minigap* terbentuk secara silih berganti.

Kata-kata kunci: *miniband*, *minigap*, *superlattice*, metode propagasi matriks

Abstract

The tunneling effect is a phenomenon where the particle can penetrate the barrier potential even though the particle energy is smaller than the barrier potential value. The probability of an electron to penetrate the barrier potential depends on the transmission coefficient. This study aims to investigate the transmission coefficient on the superlattice structure. The studied superlattice structure is formed from 12 potential barriers which are divided into two types of barriers (barrier A and barrier B). Thus, the periodicity of this superlattice is the periodicity of the two types of barrier potentials that align to each other. The transmission coefficient was calculated numerically using the matrix propagation method with the support from MATLAB R2009a software. The variations in the value of the barrier potential A are 5 eV, 10 eV, and 15 eV, while the variations in the value of the barrier potential B are 5 eV and 10 eV. Subsequently, the concept of electron effective mass is also included once in the state of barrier potential A (B) of 5 eV (10 eV). To observe clearly the miniband and minigap,

the electron energies were varied from 0 eV—15 eV. The exception is when it involves the concept of electron effective mass where the electron energy is varied from 0 eV—30 eV. Based on the results of numerical computations, the graph of relation between transmission coefficient and electron energy showed that minigap and miniband are also formed in this structure. The width of the minigap from the first to next does not increase continuously, but changes iteratively from small to large and so on. When the concept of effective mass of electrons is taken into account, the electron energy range under test must be set higher so that it is clear whether the miniband and minigap are alternately formed.

Keywords: miniband, minigap, superlattice, matrix propagation method

1. PENDAHULUAN

Fisika klasik yang didominasi oleh mekanika klasik Newtonian dan teori gelombang elektromagnetik Maxwellian berhasil menjelaskan hampir semua hasil-hasil eksperimen sains pada masa lampau. Seiring berjalannya waktu, peralatan eksperimen semakin hari semakin canggih sehingga mendorong para ilmuwan untuk terus mengembangkan eksperimen baru. Pada akhir abad ke-19, hasil eksperimen tersebut menyimpulkan bahwa ada beberapa fenomena fisis yang gagal dijelaskan oleh hukum-hukum fisika klasik. Beberapa contoh fenomena tersebut, yaitu spektrum radiasi benda hitam, efek fotolistrik, dan spektrum garis atom hydrogen. Krisis fisika klasik ini kemudian diatasi oleh Max Planck dan ilmuwan lainnya dengan menghidupkan kembali pandangan Newton mengenai cahaya. Fenomena tersebut tidak akan pernah bisa diterangkan secara memuaskan jika terus-menerus mempertahankan pandangan Huygens. Oleh karena itu, gagasan Newton dan gagasan Huygen harus disatukan yaitu cahaya dapat berperilaku sebagai partikel sekaligus berperilaku sebagai gelombang. Kesatuan gagasan tersebut merupakan salah satu ciri teori kuantum (Sudiarta, 2019).

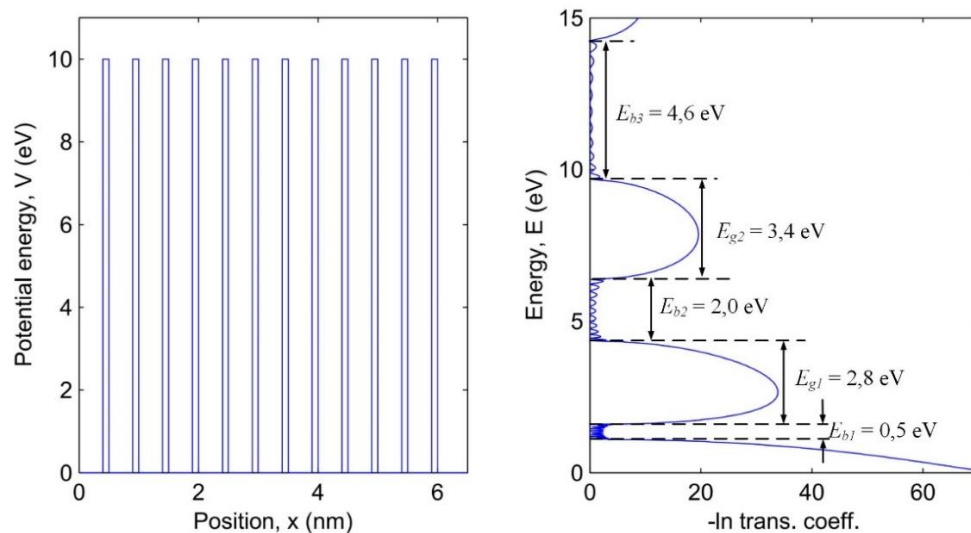
Fisika kuantum sebagai salah satu cabang ilmu fisika selalu dianggap paling sulit untuk dipahami. Pertama, konsep-konsep fisika kuantum tidak mempunyai analogi dengan fisika klasik atau bertentangan dengan logika akal sehat manusia sehingga terlihat ajaib, aneh, dan tidak masuk akal. Kedua, pemahaman fisika kuantum membutuhkan pengetahuan matematika yang lebih tinggi dibandingkan ilmu fisika lain. Sebagai contoh, konsep efek terobosan sangat mustahil untuk diamati dalam kehidupan sehari-hari. Efek ini menyatakan bahwa partikel berpeluang untuk menerobos suatu potensial penghalang meskipun energi total partikel lebih kecil dari besar potensial yang menghadangnya. Ini mengibaratkan seseorang melempar bola tenis ke tembok, tetapi bola tenis mampu menembus tembok walaupun energi kinetik bola lebih kecil dibandingkan dengan energi potensial (kekuatan) tembok (Maryana dkk, 2019).

Besar potensial penghalang ditentukan berdasarkan selisih celah energi antara sambungan dua semikonduktor yang materialnya berbeda (Pearsall, 2017). Konsep celah energi sendiri sangat penting dalam mengungkapkan mengapa suatu bahan bisa bersifat konduktor, isolator, atau semikonduktor. Keberadaannya sukses dibuktikan secara teoritik oleh model Kronig-Penney (Krane, 2014). Ketika aproksimasi dikenakan pada model Kronig-Penney, maka tampilan potensial penghalangnya sangat mirip dengan struktur potensial periodik yang dikenal sebagai struktur *superlattice*. Suatu deretan potensial periodik dinamakan sebagai *superlattice* ketika jumlahnya lebih dari sepuluh buah (Manasher, 2012). Ini menyiratkan bahwa teori semacam celah energi atau pita energi mungkin akan dijumpai ketika seseorang menyelidiki efek terobosan pada struktur *superlattice*.

Penelitian tentang efek terobosan secara teoritis dan komputasi termasuk cukup aktif di Indonesia. Nugroho (2019) menghitung koefisien transmisi elektron yang melewati tiga potensial penghalang yang masing-masing kekuatan penghalangnya diambil dari celah energi GaN, SiC, dan GaS. Pratama dkk, (2019) melaksanakan studi efek terobosan pada penghalang rangkap tiga yang energi potensialnya berasal dari celah energi InN. Rizky (2020) menganalisis relasi antara perubahan

lebar sumur dengan koefisien transmisi dan koefisien refleksi. Nasiroh (2020) membandingkan koefisien transmisi untuk empat potensial penghalang yang urutan strukturnya diulang secara kombinasi. Belakangan ini, Nuraini (2021) membuktikan bahwa koefisien transmisi dan koefisien refleksi memang bergantung dengan lebar tipisnya penghalang melalui kajiannya terhadap potensial penghalang ganda.

Walaupun persoalan tentang efek terobosan masih terus diteliti, studi yang mengkaji efek terobosan pada struktur *superlattice* dengan besar penghalang bervariasi belum pernah dilaporkan di Indonesia. Sejauh pengetahuan penulis, studi efek terobosan pada potensial periodik hanya terbatas pada potensial yang besar kekuatan penghalangnya identik semua (Manasreh, 2012; Levi, 2003; Pearsall 2017). Manasreh (2012) meneliti efek terobosan pada *superlattice* GaN/AlN yang potensial penghalang rangkap sepuluh. Levi (2003) menentukan koefisien transmisi pada *superlattice* berenergi potensial 10 eV, sedangkan Pearsall (2017) menentukan koefisien pada *superlattice* berenergi potensial 0,25 eV. Semua kajian di atas ternyata mencetuskan teori semacam pita energi atau celah energi yang lebih dikenal sebagai *miniband* dan *minigap*. Sebagai contoh, penulis menunjukkan hasil dari Levi (2003) pada gambar 1. Banyaknya sela di antara duri kecil tumpul *miniband* menunjukkan jumlah resonansi transmisi. Jumlahnya semakin jelas untuk dihitung ketika kita memperbesar rentang maksimum energi elektron. Kejelasan ini merupakan konsekuensi dari *miniband* yang tampaknya semakin lebar dari keadaan dasar ke keadaan tereksitasi berikutnya. *Minigap* yang mengiringinya juga ikut melebar sedemikian rupa.



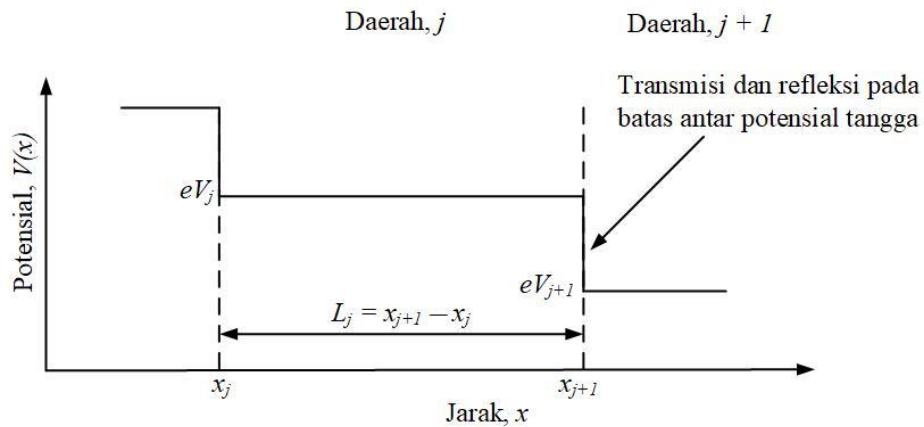
Gambar 1. Potensial penghalang rangkap 12 (kiri) dan grafik energi versus koefisien transmisi (kanan). Lambang E_{b1} , E_{b2} , dan E_{b3} disebut *miniband*, sedangkan lambang E_{g1} , E_{g2} , dan E_{g3} disebut *minigap*. Konsep massa efektif tidak diperhitungkan dalam simulasi ini.

Kemunculan baik *miniband* ataupun *minigap* dipastikan tidak terelakan ketika struktur *superlattice* memiliki energi potensial yang bervariasi. Ini dikarenakan visualisasi potensial penghalang tetap hampir mirip seperti model Kronig-Penney yang telah diaproksimasi, yaitu sama-sama memiliki sifat keperiodikan. Untuk memverifikasinya, penelitian ini diutamakan untuk menghitung koefisien transmisi dari struktur *superlattice* yang kekuatan potensial penghalangnya terdiri dari dua macam sehingga keperiodikannya muncul setiap susunan dua penghalang. Koefisien transmisi dihitung secara numerik melalui metode propagasi matriks dengan bantuan perangkat lunak MATLAB R2009a. Metode ini lebih mudah dipahami dan operasinya cukup sederhana sehingga metodenya sangat cocok untuk diterapkan pada struktur *superlattice* (Pratama dkk, 2019). Kelemahan metode ini berimplikasi pada terabainya makna fisis, tetapi tidak mengapa karena penulis hanya fokus

pada nilai koefisien transmisi. Alasan tidak dilakukan kajian secara analitik karena proses penentuan rumus koefisien transmisi untuk penghalang rangkap empat saja sudah sangat panjang, bahkan proses itu sudah melalui metode propagasi matriks. Untuk pembuktiannya, pembaca dipersilahkan membaca skripsi berjudul “Transmitansi pada Struktur Kombinasi Penghalang Potensial Penghalang Rangkap Tiga dan Empat dengan Metode Propagasi Matriks” (Nasiroh, 2020).

II. METODE PENELITIAN

2.1 Teknik Pengambilan Data



Gambar 2. Sketsa dari deretan potensial tangga satu dimensi. Energy potensial di wilayah j adalah V_j , sedangkan energi potensial di wilayah $j+1$ adalah eV_{j+1} . Terkait dengan potensial tangga di daerah j dan jarak propagasi bebas $L_j = x_{j+1} - x_j$, akan terdapat matriks 2×2 yang membawa informasi mengenai fase.

Misalkan sebuah elektron dengan energi E dan massa m datang dari kiri menuju potensial penghalang $V(x)$. Seseorang bisa menggunakan metode propagasi matriks untuk menghitung peluang kemunculan elektron pada sisi kanan potensial penghalang. Metode ini mampu menghitung koefisien transmisi secara numerik dan memperoleh bentuk analitik dari koefisien transmisi. Proses mendapatkan koefisien transmisi menggunakan metode propagasi matriks dibagi ke dalam lima langkah sebagai berikut (Levi, 2003).

1. Langkah pertama: menghitung propagasi matriks langkah \hat{p}_{step} untuk sebuah elektron yang mengenai sebuah potensial tangga tunggal. Ujung potensial tangga yang ditinjau berada pada posisi x_{j+1} seperti pada gambar 2.

Pada daerah j , elektron mempunyai bilangan gelombang

$$k_j = \frac{(2m(E - eV_j))^{1/2}}{\hbar} \quad (1)$$

di mana e : muatan elektron dan \hbar : konstanta planck dibagi 2π . Fungsi gelombang di daerah j dan $j + 1$ adalah

$$\psi_j = Ae^{ik_jx} + Be^{-ik_jx} \quad (2)$$

$$\psi_{j+1} = Ce^{ik_{j+1}x} + De^{-ik_{j+1}x} \quad (3)$$

Jika posisi $x_{j+1} = 0$ dan syarat kontinuitas diterapkan pada titik tersebut, maka diperoleh dua persamaan berikut.

$$A + B = C + D \quad (4)$$

$$A - B = \frac{k_{j+1}}{k_j} C - \frac{k_{j+1}}{k_j} D \quad (5)$$

Dengan mengubah persamaan (4) dan (5) menjadi persamaan matriks diperoleh

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{k_{j+1}}{k_j} & -\frac{k_{j+1}}{k_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix} \quad (6)$$

Namun demikian, ungkapan ini tidak dalam bentuk yang sangat berguna. Kita modifikasi ke bentuk sederhana, yaitu

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \hat{p}_{step} \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix} \quad (7)$$

di mana \hat{p}_{step} adalah matriks 2 x 2 yang menerangkan propagasi gelombang pada suatu potensial tangga. Untuk memperoleh bentuk matematisnya, kita harus mengeliminasi matriks 2 x 2 pada sisi kiri persamaan (6). Penjabaran akan menghasilkan

$$\hat{p}_{step} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \frac{k_{j+1}}{k_j} & 1 - \frac{k_{j+1}}{k_j} \\ 1 - \frac{k_{j+1}}{k_j} & 1 + \frac{k_{j+1}}{k_j} \end{bmatrix} \quad (8)$$

- Langkah kedua: menghitung propagasi antar dua potensial tangga yang dipisahkan oleh jarak L_j (lihat gambar 2). Propagasi ini membawa fase informasi dalam bentuk matriks, yaitu

$$\hat{p}_{free} = \begin{bmatrix} e^{-ik_j L_j} & 0 \\ 0 & e^{ik_j L_j} \end{bmatrix} \quad (9)$$

- Langkah ketiga: menghitung propagasi matriks pada daerah ke-j. Propagasi ini diperoleh dengan mengalikan \hat{p}_{step} dan \hat{p}_{free} . Dengan demikian, propagasi pada daerah ke-j adalah sebagai berikut.

$$\hat{p}_j = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{k_{j+1}}{k_j}\right) e^{-ik_j L_j} & \left(1 - \frac{k_{j+1}}{k_j}\right) e^{-ik_j L_j} \\ \left(1 - \frac{k_{j+1}}{k_j}\right) e^{ik_j L_j} & \left(1 + \frac{k_{j+1}}{k_j}\right) e^{ik_j L_j} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Ketika konsep massa efektif elektron diperhitungkan, \hat{p}_j menjadi (Deyasi dkk, 2011)

$$\hat{p}_j = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{m_j}{m_{j+1}} \frac{k_{j+1}}{k_j}\right) e^{-ik_j L_j} & \left(1 - \frac{m_j}{m_{j+1}} \frac{k_{j+1}}{k_j}\right) e^{-ik_j L_j} \\ \left(1 - \frac{m_j}{m_{j+1}} \frac{k_{j+1}}{k_j}\right) e^{ik_j L_j} & \left(1 + \frac{m_j}{m_{j+1}} \frac{k_{j+1}}{k_j}\right) e^{ik_j L_j} \end{bmatrix} \quad (11)$$

- Langkah keempat: menghitung propagasi matriks total \hat{P} untuk seluruh potensial tangga dengan mengalikan propagasi matriks di setiap daerah. Misalkan ada N potensial tangga maka

$$\hat{P} = \hat{p}_1 \hat{p}_2 \hat{p}_3 \dots \hat{p}_j \dots \hat{p}_N = \prod_{j=1}^N \hat{p}_j \quad (12)$$

- Langkah terakhir: memperoleh rumus untuk menghitung koefisien transmisi. Karena partikel datang dari sebelah kiri, maka $A = 1$, dan tidak ada pantulan dari kanan ke kiri, maka $D = 0$. Rumus koefisien transmisi pada akhirnya didapatkan sebagai berikut.

$$T = |C|^2 = \left| \frac{1}{p_{11}} \right|^2 \quad (13)$$

Nilai koefisien transmisi diplot dalam skala logaritma natural negatif untuk memudahkan analisis.

Nilai koefisien transmisi dihitung secara numeric dengan perangkat lunak MATLAB R2009a. Untuk mengamati *miniband* dan *minigap* dengan jelas, penulis menampilkan grafik hubungan antara energi elektron dan koefisien transmisi.

2.2 Variabel Komputasi

Landasan dari jumlah potensial penghalang, lebar potensial penghalang, lebar sumur, massa efektif elektron m^* , rentang energi elektron, dan kekuatan potensial penghalang V dalam penelitian ini mengacu dari Levi (2003). Struktur *superlattice* dibatasi dalam ruang satu dimensi. Struktur ini terdiri dari 12 penghalang yang terbagi menjadi dua variasi. Masing-masing variasi berjumlah enam buah. Variasi pertama dinotasikan sebagai penghalang A, sedangkan variasi kedua dinotasikan sebagai penghalang B. Kemudian, pengaturan keperiodikan dari *superlattice* ini adalah susunan penghalang A dan penghalang B yang saling berdampingan secara spasial sehingga keperiodikannya adalah A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-A-B. Setiap penghalang memiliki lebar 0,1 nm dimana masing-masing penghalang dipisahkan sejarak 0,4 nm (lebar sumur).

Untuk menyelidiki peluang transmisi dengan saksama, penulis menjalankan komputasi numerik untuk empat kasus, yaitu:

1. $V_A = 5 \text{ eV}; V_B = 10 \text{ eV}$.
2. $V_A = 15 \text{ eV}; V_B = 10 \text{ eV}$.
3. $V_A = 10 \text{ eV}; V_B = 5 \text{ eV}$.
4. Sama seperti kasus pertama, namun massa efektif elektron diperhitungkan. Massa efektif elektron diasumsikan sama untuk setiap daerah, yakni $m^* = 0,07 m$.

Salah satu besar potensial penghalang dari kasus I sampai kasus IV memang sengaja diatur bernilai 10 eV yang sesuai dengan keadaan kasus Levi (2003). Lalu, setiap besar potensial penghalang satunya memiliki selisih 5 eV yang dirasa cukup untuk menganalisis perubahan nilai koefisien transmisi dari keadaan sebelumnya. Di samping itu, alasan $m^* = 0,07 m$ dipilih agar tidak terlalu menyimpang dari m^* di pita konduksi semikonduktor GaAs/Al_xGa_{1-x}As. Hal ini dikarenakan jajaran potensial penghalang yang kekuatannya bervariasi paling mungkin dihasilkan melalui heterostruktur GaAs/Al_xGa_{1-x}As dengan memvariasikan fraksi mol.

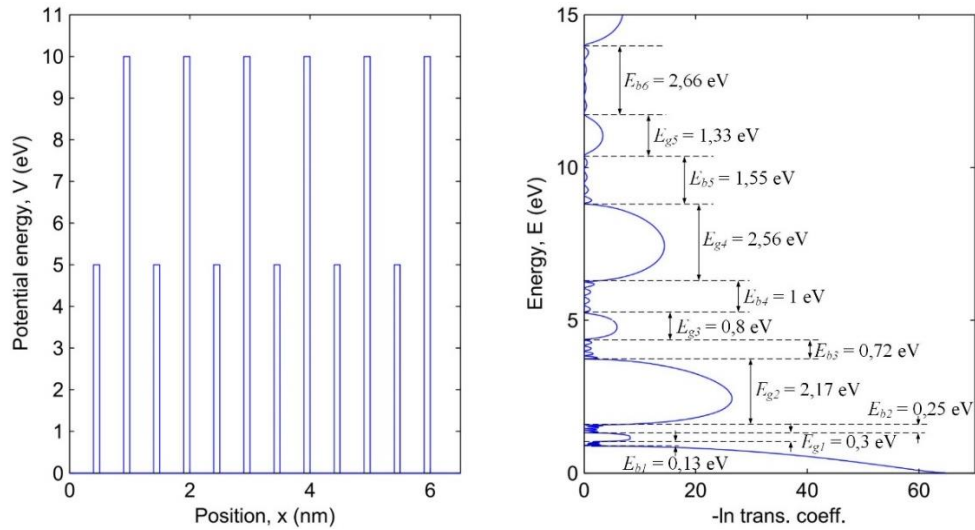
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk setiap simulasi, energi elektron divariasikan dari 0 eV sampai 15 eV agar frekuensi kemunculan *miniband* dan *minigap* dapat diobservasi lebih detail. Berikut ini merupakan hasil dari penelitian untuk tiap-tiap keadaan.

1. Simulasi kasus I

Pada gambar 3, grafik ternyata juga memperlihatkan eksistensi *miniband* dan *minigap*. Akan tetapi, setiap *miniband* menunjukkan jumlah resonansi transmisi yang tidak sama dengan jumlah potensial sumur. Sebagai contoh, E_{b6} hanya memperlihatkan lima resonansi transmisi. Ini bertentangan dengan hasil dari Levi (2003) dan Manasreh (2012). Mereka menyatakan bahwa satu resonansi transmisi berkorespondensi dengan satu potensial sumur. Dengan kata lain, total resonansi transmisi selalu setara dengan total *miniband*, baik pada keadaan dasar maupun keadaan tereksitasi. Namun sekarang, ketidaksetaraan muncul karena terdapat dua variasi kekuatan potensial penghalang. Walaupun penulis tidak dapat memvalidasi pernyataan ini secara analitik, akan tetapi pengamatan secara visual memberikan penjelasan atas ketidaksetaraan ini. Pengamatan dilakukan dengan mengabaikan salah satu potensial penghalang, baik A ataupun B, secara menyeluruh. Pengabaian ini mereduksi total potensial sumur dari sepuluh buah menjadi lima buah yang setara dengan total resonansi transmisi. Kemudian, perhatikan bahwa jika kita membandingkan gambar 1 dan gambar 3, maka

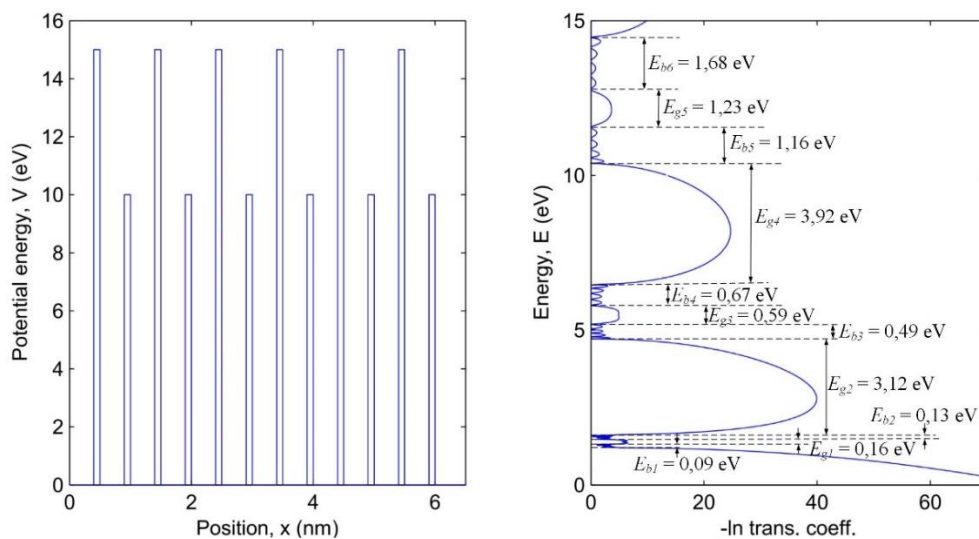
kita seolah-olah melihat *minigap* tipis (E_{g1} , E_{g3} , dan E_{g5} pada gambar 3) muncul di sekitaran pertengahan *miniband* (E_{b1} , E_{b2} , dan E_{b3} pada gambar 1). Berdasarkan fakta ini, penulis memprediksi bahwa jika simulasi diterapkan pada struktur *superlattice* yang berkekuatan potensial tiga macam variasi (disusun secara berurutan), maka dua *minigap* dengan energi yang kecil mungkin akan muncul di setiap *miniband* gambar 1.



Gambar 3. Bagian kiri memperlihatkan model potensial penghalang ketika $V_A = 5$ eV dan $V_B = 10$ eV, sedangkan bagian kanan merupakan grafik hubungan antara energi elektron dan koefisien transmisi

2. Simulasi kasus II

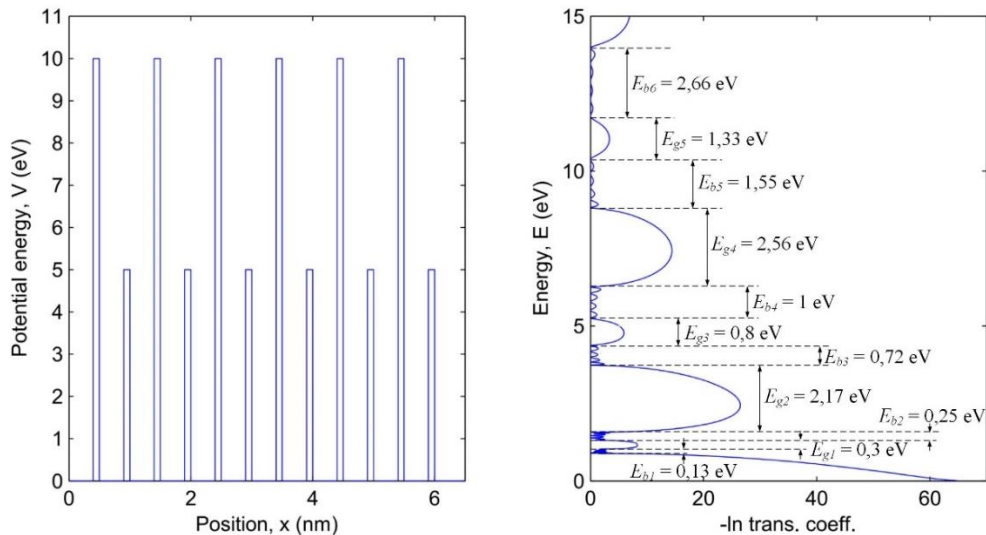
Berdasarkan gambar 4, peristiwa resonansi pertama terjadi pada energi elektron yang lebih besar dari kasus pertama. Hal ini karena secara keseluruhan kekuatan potensial penghalang kasus kedua lebih kuat daripada kekuatan potensial penghalang kasus pertama. Di samping itu, perbandingan secara langsung setiap *miniband* dan *minigap* antara gambar 4 dan gambar 3 memperlihatkan bahwa energi *minigap* (*miniband*) pada kasus kedua lebih besar (kecil) daripada kasus pertama. Hasil ini sesuai dengan teori efek terobosan dan teori pita energi yang menyatakan bahwa semakin tebal suatu *minigap* berarti semakin kecil transmitansi elektron.



Gambar 4. Bagian kiri memperlihatkan model potensial penghalang ketika $V_A = 15$ eV dan $V_B = 10$ eV, sedangkan bagian kanan merupakan grafik hubungan antara energi elektron dan koefisien transmisi

3. Simulasi kasus III

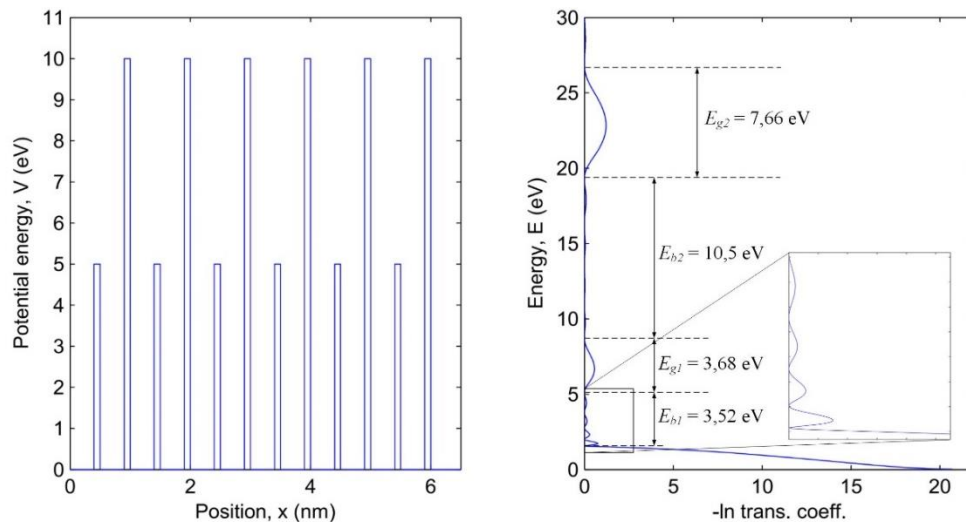
Berdasarkan gambar 5, kurva pada grafik energi elektron terhadap koefisien transmisi sama persis dengan kasus kedua. Perbedaannya hanya pada susunan potensial penghalang yang merupakan kebalikan dari kasus pertama. Hasil tersebut bersesuaian dengan penelitian Nasiroh (2020) dan Rizky (2020), yaitu nilai koefisien transmisi suatu partikel sama untuk tiap-tiap energinya ketika menerobos penghalang-penghalang yang disusun secara berkebalikan dengan mempertahankan lebar potensial sumur yang tetap.



Gambar 5. Bagian kiri memperlihatkan model potensial penghalang ketika $V_A = 10$ eV dan $V_B = 5$ eV, sedangkan bagian kanan merupakan grafik hubungan antara energi elektron dan koefisien transmisi

4. Simulasi kasus IV

Dari gambar 6 dapat dilihat bahwa kehadiran massa efektif elektron $m^* = 0,07 m$ menghasilkan grafik yang sangat jauh berbeda dengan kasus pertama ketika walaupun sama-sama berada pada susunan $V_A = 5$ eV dan $V_B = 10$ eV. Silih berganti antara *miniband* dan *minigap* dapat diamati jika energi elektron divariasikan dari 0 eV sampai 30 eV. Ini terjadi karena *miniband* pertama saja sudah berenergi 3,52 eV, bahkan miniband berikutnya adalah 10,5 eV. Alasan mengapa energinya jauh lebih besar dari kasus pertama memerlukan persamaan analitik koefisien transmisinya. Pekerjaan ini tidak mudah dilakukan dan memerlukan bantuan komputer. Akan tetapi, penghampiran dapat dilakukan dengan melakukan simulasi sekaligus perhitungan analitik pada potensial penghalang empat yang terbagi menjadi dua variasi energi. Pengusulan ini dipertimbangkan sebagai pekerjaan masa depan oleh penulis.



Gambar 6. Bagian kiri memperlihatkan model potensial penghalang ketika $V_A = 5$ eV dan $V_B = 10$ eV, sedangkan bagian kanan merupakan grafik hubungan antara energi elektron dan koefisien transmisi. Konsep massa efektif diperhitungkan dalam simulasi ini, yakni $m^* = 0,07 m$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kesimpulan

1. Efek terobosan pada struktur superlattice dengan dua variasi potensial penghalang ternyata juga menghasilkan grafik yang menampilkan adanya *miniband* dan *minigap*. Pada simulasi kasus mana pun, ukuran *minigap* dari keadaan dasar sampai keadaan tereksitasi berikutnya selalu beriterasi, yakni kecil–besar–kecil–besar dan seterusnya.
2. Keterlibatan konsep massa efektif elektron membuat *miniband* dan *minigap* menjadi lebar sehingga energi elektron harus diuji sampai 30 eV agar *miniband* dan *minigap* terlihat secara silih berganti pada grafik hubungan antara energi elektron dan koefisien transmisi.

Saran

Untuk peneliti selanjutnya dapat menambah variasi energi potensial penghalang pada struktur *superlattice* menjadi tiga macam atau memperbanyak jumlah potensial penghalang dengan keadaan dan kondisi percobaan yang sama.

DAFTAR PUSTAKA

- Deyasi, A., dkk. (2011). *Calculating Transmission Coefficient of Double Quantum Well Triple Barrier Structure having Parabolic Geometry using Propagation Matrix Method*. International Journal of Engineering and Advanced Technology, 1(2), 37-41.
- Krane, K. (1992). *Fisika Modern*. Jakarta: Universitas Indonesia Press.
- Levi, A. F. J. (2003). *Applied Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Manasreh, O. (2012). *Introduction to Nanomaterials and Devices*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Maryana, O. F. T. dan Tiandho, T. (2019). *Fisika Kuantum*. Bandung: Yrama Widya.
- Nasiroh, C. (2020). *Transmitansi pada Struktur Kombinasi Penghalang Potensial Rangkap Tiga dan Empat dengan Metode Propagasi Matriks*. Skripsi Universitas Jember.
- Nugroho, C. I. W. (2019). *Koefisien Transmisi pada Efek Terobosan Penghalang Potensial Penghalang Rangkap Tiga GaN, SiC, dan GaAs*. Skripsi Universitas Jember.

- Nuraini, S. (2021). *Efek Penerobosan pada Potensial Penghalang ganda Simetris dalam Sistem Kuantum*. Skripsi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
- Pearsall, T. P. (2017). *Quantum Photonics*. Cham: Springer International Publishing.
- Pratama, M. A., Nugroho, C. I. W., dan Agustin, N. C. (2019). *Koefisien Transmisi InN (Indium Nitrit) Penghalang Tunggal Hingga Penghalang Tiga dengan Metode Schrodinger*. Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Fisika, 4(1), 102-106.
- Rizky, N. (2020). *Analisis Hubungan Jarak Antara Penghalang Ganda dengan Koefisien Transmisi dan Koefisien Refleksi*. Skripsi Universitas Jember.
- Sudiara, I W. (2019). *Mekanika Kuantum*. Selong: Garuda Ilmu