

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Penggunaan semikonduktor sebagai komponen utama dalam sirkuit terpadu/*integrated circuit* untuk *Central Processing Unit* (CPU) memulai revolusi dalam teknologi mikroprosesor, yang berpuncak pada pengembangan Intel 4004 pada tahun 1971, yang secara umum dianggap sebagai mikroprosesor pertama. Sebelumnya, pada tahun 1960-an, teknologi transistor *Metal Oxide Semiconductor* (MOS) mulai menunjukkan potensinya dengan memungkinkan integrasi yang lebih padat dan biaya produksi yang lebih rendah dibandingkan dengan transistor bipolar. Hal ini memberikan cara bagi chip *Large Scale Integration* (LSI) untuk mengintegrasikan 100 atau lebih gerbang logika dan dengan demikian menjadi sangat menarik untuk manufaktur komputer.

Pada akhir tahun 1960-an, MOS LSI yang diterapkan dalam komputasi menghasilkan komputer seperti D200 dari Autonetics, sebuah komputer serba guna yang ringkas yang digunakan untuk navigasi dan manajemen bahan bakar di militer [1].



**Gambar 1.1:** Intel 4004 merupakan mikroprosesor awal yang dikomersilkan, dirilis pertama kali tahun 1971 [1]

Gambar 1.1 menampilkan mikroprosesor Intel 4004 yang merupakan salah satu mikroprosesor pertama yang diproduksi secara komersial, mikroprosesor tersebut dilengkapi dengan 2.300 transistor. Gambar tersebut memperlihatkan *layout* sirkuit internal mikroprosesor yang terdiri dari jalur-jalur koneksi dan komponen elektronik yang tersusun dalam pola yang sangat kompleks. Struktur ini menunjukkan tingkat kecanggihan teknologi semikonduktor pada masanya, yang menjadi fondasi penting dalam perkembangan komputasi modern.

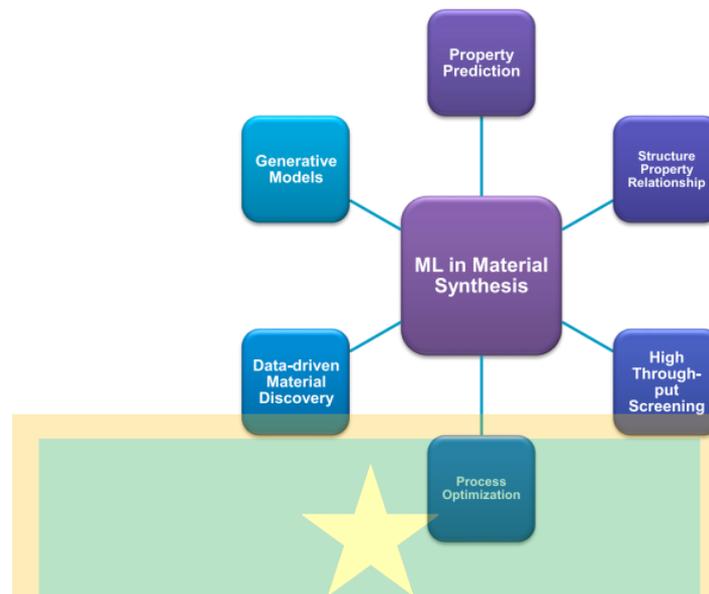
Sejak era 1960-an, Gallium Arsenida (GaAs) telah menjadi pionir dalam revolusi semikonduktor, dimulai dari aplikasi dioda pemancar cahaya (LED) hingga komponen frekuensi tinggi seperti transistor HEMT (*High-Electron-Mobility Transistor*) pada 1980-an. Perkembangan teknik doping—dari sulfur (S) dan tellurium (Te) untuk tipe-n, hingga magnesium (Mg) dan karbon (C) untuk tipe-p—telah mengoptimalkan mobilitas elektron ( $\sim 8.000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) dan membuka jalan bagi GaAs dalam teknologi satelit, radar, dan komunikasi 5G. Di era 2000-an, GaAs mendominasi optoelektronik dengan laser dioda dan sel surya efisiensi tinggi, didukung epitaksi presisi MBE (*Molecular Beam Epitaxy*) dan MOCVD (*Metal-Organic Chemical Vapor Deposition*). Namun, tuntutan mikroprosesor modern akan kecepatan tinggi, disipasi panas efisien, dan konsumsi daya rendah menggeser fokus ke senyawa GaAs dengan dopan Aluminium yang memiliki sifat yang dapat diatur tingkatannya sesuai keinginan aplikasi semikonduktor tertentu, yaitu paduan  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Material ini menawarkan *bandgap* yang dapat disetel (1.42–2.16 eV) dan kompatibilitas dengan heterostruktur kuantum, tetapi optimasi komposisi  $x$  untuk menyeimbangkan mobilitas elektron, konduktivitas termal (20–30 W/mK), dan stabilitas termal masih terhambat oleh kompleksitas eksperimen konvensional dan simulasi *first-principles* yang mahal.

Material  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , yang dikembangkan melalui metode deposisi elektrokimia pada substrat GaAs, memiliki potensi yang sangat besar untuk fabrikasi CPU dan mikroprosesor.  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  memiliki kristalinitas yang tinggi dan sifat celah pita yang dapat diatur skalabilitasnya dalam rasio komposisi  $0 \leq x \leq 1$ . Beberapa keunikan dari *nanowhiskers*  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

adalah ukurannya yang kecil dan panjangnya yang bervariasi. Keunikan ini dapat meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya dengan mengurangi kehilangan energi akibat rekombinasi pada permukaan [2-3]

Senyawa GaAs/Paduan  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  memiliki sifat elektrofisik yang sangat baik yang memungkinkan produksi perangkat frekuensi tinggi yang lebih optimal dibandingkan dengan yang berbasis silikon. Lapisan paduan yang sangat teraloi biasanya digunakan sebagai lapisan dasar atau kontak pada heterotransistor transfer muatan balistik bipolar, meningkatkan kinerja perangkat optoelektronik yang terkait. Mobilitas pembawa muatan yang tinggi, yang sangat penting dalam pengembangan perangkat semikonduktor, juga mendukung penggunaan  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  dalam aplikasi CPU atau mikroprosesor, memberikan alternatif yang menjanjikan untuk mengatasi batasan material semikonduktor tradisional seperti silikon [4].

Pendekatan berbasis data menggunakan kecerdasan buatan/ *Artificial Intelligence* (AI) sangat penting dalam penemuan dan desain material, optimalisasi komposisi dan struktur material. Dalam konteks ini, pembelajaran mesin/*Machine Learning* (ML) digunakan untuk mengembangkan dan memvalidasi material baru dengan sifat yang diinginkan [5-8]. Hasil dari hal ini akan memungkinkan model kecerdasan buatan untuk menganalisis dan memprediksi variasi komposisi Al dan Ga sehubungan dengan sifat fisik dan elektronik material, sehingga membantu penemuan komposisi yang lebih baru dan lebih efisien untuk aplikasi spesifik dalam CPU dan mikroprosesor. Hal ini akan memungkinkan para peneliti dan pengembang model kecerdasan buatan untuk mempelajari secara sistematis rasio komposisi yang berbeda dari Al dan Ga sambil memahami pengaruh banyaknya komposisi Al terhadap sifat material seperti celah pita dan konduktivitas, yang secara langsung berhubungan dengan kinerja semikonduktor dalam aplikasi teknologi tinggi.

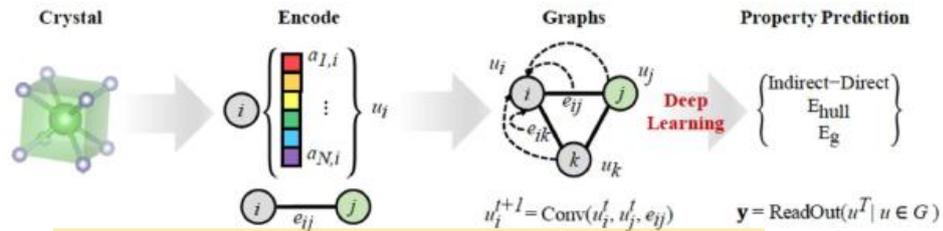


**Gambar 1.2** Aplikasi pembelajaran mesin dalam sintesis material [8].

Gambar 1.2 mengilustrasikan diagram aplikasi Pembelajaran Mesin/*Machine Learning* (ML) dalam sintesis material yang terdiri dari beberapa pengaplikasian. Pengaplikasiannya tersebut meliputi Model Generatif (*Generative Models*), Penemuan Material Berbasis Data (*Data-driven Material Discovery*), Optimasi Proses (*Process Optimization*), Penapisan Keluaran Tinggi (*High Throughput Screening*), Hubungan Struktur-Properti (*Structure Property Relationship*), dan Prediksi Properti (*Property Prediction*). Diagram ini menunjukkan bagaimana pembelajaran mesin dapat diintegrasikan secara komprehensif dalam berbagai aspek pengembangan dan desain material, yang mencerminkan pendekatan modern dalam penelitian material.

Pendekatan hubungan struktur-properti memungkinkan model kecerdasan buatan untuk memprediksi sifat yang diinginkan berdasarkan parameter struktur yang didapat. Dengan cara ini, memungkinkan untuk menjelajahi ruang desain material dan mengidentifikasi komposisi baru yang mungkin memiliki sifat yang optimal untuk aplikasi tertentu [9-11] seperti semikonduktor dalam CPU atau mikroprosesor. Sehingga mengoptimalkan proses pengoptimalan struktur material dan mempercepat pengembangan teknologi semikonduktor berikutnya. Seperti pada penelitian [12], penggunaan model jaringan syaraf tiruan dapat memetakan struktur kristal ke representasi

graf, sehingga pemetaan struktur tersebut akan dijadikan sebagai data latih untuk memprediksi sifat material yang diinginkan, seperti celah pita, energi, dan sifat langsung/tidak langsung.



**Gambar 1.3** Memetakan kristal ke representasi graf melalui pengkodean, digunakan untuk melatih jaringan saraf graf untuk memprediksi properti yang diinginkan [12].

Gambar 1.3 menunjukkan alur proses prediksi properti material kristal menggunakan pendekatan pembelajaran mendalam (*deep learning*). Proses ini terdiri dari empat tahap utama: dimulai dari struktur kristal, dilanjutkan dengan pengkodean (*encoding*) yang mengubah informasi struktural menjadi representasi numerik, kemudian transformasi ke dalam bentuk graf yang menggambarkan hubungan antar atom, dan akhirnya tahap prediksi properti menggunakan metode pembelajaran mendalam. Diagram ini juga mencakup persamaan matematis yang menjelaskan proses konvolusi pada graf dan perhitungan output, yang digunakan untuk memprediksi properti material

Meskipun  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  telah lama dimanfaatkan dalam aplikasi optoelektronik dan perangkat *high-frequency*, kajian komprehensif mengenai hubungan parameter struktural (seperti komposisi Al, distribusi atom Al/Ga, dan geometri ikatan) dengan sifat material kritis untuk mikroprosesor—seperti mobilitas elektron, konduktivitas termal, dan stabilitas pada skala nanometri—masih sangat terbatas. Eksperimen konvensional atau simulasi berbasis DFT/MD untuk mengeksplorasi seluruh ruang komposisi  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  memerlukan waktu dan biaya komputasi yang *prohibitive*, terutama ketika menargetkan optimasi multi-properti untuk desain mikroprosesor generasi mendatang. Keterbatasan ini menciptakan celah antara kebutuhan industri semikonduktor yang dinamis dengan kemampuan metode tradisional dalam menyediakan solusi material yang efisien. Di sinilah pendekatan kecerdasan

buatan, seperti pemodelan graf jaringan syaraf tiruan, muncul sebagai alternatif revolusioner. Dengan memanfaatkan kemampuan AI dalam memetakan hubungan struktur-properti secara cepat dan akurat, penelitian ini bertujuan mengisi kekosongan kajian tersebut melalui prediksi komposisi  $Al_xGa_{1-x}As$  yang optimal untuk aplikasi mikroprosesor, sekaligus membuktikan bahwa metode komputasional berbasis AI dapat menjadi pelengkap atau bahkan pengganti yang layak bagi pendekatan eksperimental konvensional.

## 1.2 Rumusan Masalah

Melalui penguraian hal yang melatarbelakangi penelitian ini, dapat dirumuskan permasalahan, yaitu:

1. Kompleksitas dalam perancangan material semikonduktor  $Al_xGa_{1-x}As$ , secara konvensional yang membutuhkan waktu dan biaya tinggi, sehingga diperlukan pengembangan teknik pemodelan kecerdasan buatan untuk mengoptimalkan proses perancangan.
2. Belum adanya kajian komprehensif mengenai komposisi rasio  $x$  yang optimal pada material  $Al_xGa_{1-x}As$  untuk penggunaan yang efektif sebagai komponen penyusun CPU/ *microprocessor*, sehingga diperlukan penentuan komposisi yang tepat berdasarkan parameter sifat mikrostruktur dan sifat fisis.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan perumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang material semikonduktor  $Al_xGa_{1-x}As$  menggunakan teknik pemodelan kecerdasan buatan.
2. Memberikan rekomendasi komposisi rasio  $x$  yang optimal untuk penggunaan  $Al_xGa_{1-x}As$  sebagai material semikonduktor penyusun CPU/mikroprosesor dengan parameter sifat mikrostruktur dan sifat fisis berdasarkan parameter komputasi yang sesuai.

#### 1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan penelitian ini, manfaat yang diharapkan dari penelitian yang dilakukan peneliti adalah:

1. Penelitian ini diharapkan dapat mengembangkan ilmu pengetahuan dalam bidang material semikonduktor, terutama dalam penggunaan teknik pemodelan kecerdasan buatan untuk penemuan material baru berbasis data.
2. Membantu dalam pengembangan teknologi yang lebih canggih dalam manufaktur dan meningkatkan kinerja perangkat elektronik.

#### 1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini terbatas pada prediksi sifat-sifat material yang berhubungan dengan sifat semikonduktor yang penting sebagai penyusun CPU/mikroprosesor menggunakan data yang sudah ada, tanpa melibatkan eksperimen laboratorium fisik.
2. Analisis akan difokuskan pada komposisi rasio Al dan Ga dari 0 sampai 1, tanpa mempertimbangkan aditif atau dopan lain.
3. Model kecerdasan buatan yang dikembangkan akan dibatasi pada data yang tersedia dan mungkin memerlukan validasi lebih lanjut untuk prediksi di luar data yang digunakan.

#### 1.6 Sistematika Penulisan

Pada Laporan Tugas Akhir ini, penulis menuliskan dalam 5 Bab:

1. Bab 1 Pendahuluan

Bab ini meliputi motivasi penulis untuk penelitian dengan memberikan latar belakang yang mendetail mengenai pentingnya dan relevansi material semikonduktor, khususnya  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , dalam industri teknologi. Bab ini

juga mencakup perumusan masalah yang jelas, tujuan penelitian yang ingin dicapai, serta manfaat dan batasan yang dihadapi dalam penelitian. Pendahuluan ini bertujuan untuk memberikan pembaca pemahaman menyeluruh tentang apa yang akan diteliti dan mengapa penelitian ini penting.

## 2. Bab 2 Tinjauan Literatur

Bab ini akan menyajikan tinjauan literatur yang ekstensif tentang penggunaan  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sebagai material semikonduktor, dengan fokus pada penelitian sebelumnya yang telah dilakukan dalam area ini. Tinjauan ini akan mencakup studi terkait sifat mikrostruktur dan fisis material, penggunaan teknik pemodelan kecerdasan buatan dalam penelitian material, dan bagaimana ini berkontribusi pada pengembangan CPU/microprocessor. Bab ini akan membantu menetapkan dasar teori untuk metodologi yang akan diterapkan dan menunjukkan celah dalam penelitian yang penelitian ini bertujuan untuk mengisi.

## 3. Bab 3 Metodologi Penelitian

Bab ini akan mendeskripsikan metodologi yang digunakan dalam penelitian ini, termasuk pengumpulan data, pemilihan model kecerdasan buatan, dan pendekatan analitis yang digunakan untuk mengevaluasi dan mengoptimalkan komposisi rasio  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Bab ini akan memberikan detail tentang bagaimana data dikumpulkan, bagaimana model dikembangkan dan dilatih, serta kriteria yang digunakan untuk menilai efektivitas model dalam memprediksi sifat material yang diinginkan.

## 4. Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Bab ini akan menyajikan hasil dari penelitian ini, termasuk analisis dari model kecerdasan buatan yang dikembangkan dan bagaimana model tersebut berhasil memprediksi komposisi rasio yang optimal untuk  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Bab ini juga akan membahas hasil tersebut dalam konteks literatur

yang ada, mengevaluasi kekuatan dan keterbatasan pendekatan penelitian, dan mendiskusikan implikasi temuan untuk industri semikonduktor.

## 5. Bab 5 Kesimpulan dan Saran

Bab terakhir ini akan merangkum temuan penelitian dan menyajikan kesimpulan yang dapat diambil dari studi ini. Bab ini juga akan memberikan rekomendasi berdasarkan hasil penelitian, baik untuk aplikasi praktis dalam industri maupun untuk penelitian masa depan dalam bidang ini. Kesimpulan dan saran ini bertujuan untuk memberikan panduan kepada para praktisi industri dan peneliti lain yang mungkin ingin membangun atau memperluas pada pekerjaan yang dilakukan dalam penelitian ini.

