

KECERDASAN KOMPUTASIONAL

Dahlan Abdullah, Zahratul Fitri
Rini Meiyaniti, Fajriana, Muhammad Faisal

KECERDASAN KOMPUTASIONAL

**Dahlan Abdullah
Zahratul Fitri
Rini Meiyanti
Fajriana
Muhammad Faisal**



Penerbit KBM Indonesia

Adalah penerbit dengan misi memudahkan proses penerbitan buku-buku penulis di tanah air indonesia, serta menjadi media *sharing* proses penerbitan buku

KECERDASAN KOMPUTASIONAL

Copyright @2026 by Dahlan Abdullah, dkk

All rights reserved

KARYA BAKTI MAKMUR (KBM) INDONESIA

Anggota IKAPI (Ikatan Penerbit Indonesia) **NO. IKAPI 279/JTI/2021**

Depok, Sleman-Jogjakarta (Kantor) **081357517526 (Tlpn/WA)**

Penulis

Dahlan Abdullah

Zahratul Fitri

Rini Meiyanti

Fajriana

Muhammad Faisal

Desain Sampul

Eca Art

Tata Letak

Lailatul Nur Ula

Editor Naskah

Dwi Fitri, S.Sos., M.A.

E-ISBN

978-634-278-268-2

15,5 x 23 cm, viii + 540 halaman

Cetakan ke-1, April 2026

Isi buku diluar tanggungjawab penerbit

Hak cipta merek KBM Indonesia sudah terdaftar di

DJKI-Kemenkumham dan isi buku dilindungi undang-undang

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau

Memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini

Tanpa seizin penerbit karena beresiko sengketa hukum

Website

<https://penerbitkbm.com>

www.penerbitbukumurah.com

Instagram

@penerbit.kbmindonesia

@penerbitbukujogja

Email

naskah@penerbitkbm.com

Distributor

<https://penerbitkbm.com/toko-buku/>

Youtube

Penerbit KBM Sastrabook

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

- (i) Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
- (ii) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- (iii) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
- (iv) Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

PRAKATA

Buku ini hadir sebagai respons terhadap pesatnya perkembangan dan signifikansi Kecerdasan Komputasional (Computational Intelligence) dalam membentuk masa depan teknologi. Penulisan buku ini didasari oleh keinginan untuk menyajikan panduan komprehensif yang menjembatani teori dan aplikasi praktis, sehingga dapat diakses oleh berbagai kalangan. Tujuannya adalah membekali pembaca dengan pemahaman mendalam mengenai strategi dan teknologi terkini dalam bidang ini, mulai dari konsep dasar hingga implementasi tingkat lanjut.

Ruang lingkup materi mencakup berbagai paradigma Kecerdasan Komputasional, seperti komputasi berbasis populasi, *swarm intelligence*, jaringan saraf tiruan, logika fuzzy, hingga integrasinya dengan *deep learning* dan komputasi kuantum. Buku ini ditujukan bagi mahasiswa, peneliti, praktisi, serta siapa pun yang memiliki minat besar terhadap Kecerdasan Komputasional dan ingin memahami potensinya dalam memecahkan masalah kompleks di berbagai sektor.

Kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan buku ini. Harapan kami, buku ini tidak hanya menjadi sumber referensi yang berharga, tetapi juga mampu menginspirasi pembaca untuk terus berinovasi dan mengembangkan solusi cerdas yang bermanfaat bagi kemajuan peradaban.

Penulis

KATA PENGANTAR

Dalam lanskap teknologi yang terus berkembang pesat, Kecerdasan Komputasional telah muncul sebagai pilar fundamental yang mendorong inovasi dan transformasi di berbagai sektor. Buku *Kecerdasan Komputasional* ini merupakan kontribusi signifikan dalam literatur ilmiah, yang dirancang untuk membimbing pembaca melalui kompleksitas dan potensi tak terbatas dari bidang ini. Sebagai editor, kami merasa terhormat dapat menyajikan karya yang begitu komprehensif dan relevan.

Struktur buku ini telah disusun secara cermat untuk memastikan alur pembelajaran yang logis dan progresif. Dimulai dengan pengantar yang kokoh mengenai definisi dan evolusi Kecerdasan Komputasional di Bab 1, buku ini kemudian menyelami berbagai paradigma inti seperti Komputasi Berbasis Populasi (Bab 2), *Swarm Intelligence* (Bab 3), Jaringan Saraf Tiruan (Bab 4), dan Logika Fuzzy (Bab 5). Keunggulan buku ini terletak pada kemampuannya untuk mengintegrasikan konsep-konsep dasar dengan topik-topik mutakhir, termasuk Algoritma Pembelajaran Mesin (Bab 6), *Hybrid Systems* (Bab 7), *Deep Learning* dan *Transfer Learning* (Bab 8), hingga eksplorasi Komputasi Kuantum (Bab 9) dan penerapannya dalam *Big Data* (Bab 10).

Lebih jauh, buku ini tidak hanya berfokus pada aspek teoritis, tetapi juga menyoroti implementasi praktis di berbagai industri (Bab 11), platform dan alat pemrograman (Bab 12), serta evaluasi sistem (Bab 13). Puncaknya, pembahasan mengenai etika, privasi, dan masa depan Kecerdasan Komputasional di Bab 14 menegaskan relevansi sosial dan tanggung jawab yang melekat pada pengembangan teknologi ini. Kami yakin bahwa buku ini akan menjadi referensi esensial bagi akademisi, peneliti, praktisi, dan siapa pun yang ingin memahami dan membentuk masa depan yang didorong oleh kecerdasan.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	i
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI.....	v
BAB 1 PENGANTAR KECERDASAN KOMPUTASIONAL.....	1
1.1 Definisi dan Ruang Lingkup	1
1.2 Evolusi dan Sejarah Singkat	8
1.3 Kecerdasan Komputasional vs. Kecerdasan Buatan	13
1.4 Penerapan di Dunia Nyata	18
1.5 Tantangan dan Peluang.....	23
1.6 Arah dan Tren Masa Depan	28
BAB 2 KOMPUTASI BERBASIS POPULASI.....	35
2.1 Dasar Teori Algoritma Evolusioner.....	35
2.2 Algoritma Genetika (GA)	42
2.3 Pemrograman Genetik	49
2.4 Optimasi Koloni Semut (ACO)	53
2.5 Strategi Evolusi.....	60
2.6 Penerapan pada Optimasi Kompleks.....	66
BAB 3 KOMPUTASI BERBASIS SWARM INTELLIGENCE	73
3.1 Konsep Dasar <i>Swarm Intelligence</i>	73
3.2 <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO).....	79
3.3 <i>Bat Algorithm</i>	85
3.4 <i>Firefly Algorithm</i>	92
3.5 <i>Whale Optimization Algorithm</i>	98
3.6 Studi Kasus dan Implementasi	105

BAB 4 JARINGAN SARAF TIRUAN (<i>ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS</i>)	113
4.1 Arsitektur dan Prinsip Dasar	113
4.2 <i>Perceptron</i> dan <i>Multilayer Perceptron</i>	119
4.3 Proses Pelatihan dan <i>Backpropagation</i>	125
4.4 <i>Deep Learning</i> dan CNN	132
4.5 Regularisasi dan <i>Overfitting</i>	138
4.6 Aplikasi di Bidang Gambar, Suara, dan Teks	145
BAB 5 LOGIKA FUZZY DAN SISTEM INFERENSI	151
5.1 Pengantar Logika Fuzzy	151
5.2 <i>Fuzzy Set</i> dan <i>Membership Function</i>	158
5.3 Sistem Inferensi Fuzzy	165
5.4 <i>Fuzzy Rule-Based System</i>	174
5.5 Integrasi <i>Fuzzy</i> dengan Sistem Lain	181
5.6 Contoh Implementasi Praktikal	187
BAB 6 ALGORITMA PEMBELAJARAN MESIN (<i>MACHINE LEARNING</i>)	197
6.1 <i>Supervised</i> dan <i>Unsupervised Learning</i>	197
6.2 Klasifikasi dan Regresi	204
6.3 <i>Clustering</i> dan <i>Dimensionality Reduction</i>	210
6.4 Model Evaluasi dan Validasi	216
6.5 <i>Ensemble Learning</i>	222
6.6 Integrasi dengan Kecerdasan Komputasional	230
BAB 7 <i>HYBRID SYSTEMS</i> DALAM KECERDASAN KOMPUTASIONAL	235
7.1 Definisi dan Konsep Hybrid	235
7.2 Fuzzy-ANN	242
7.4 PSO-Fuzzy	250
7.5 <i>Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)</i>	258
7.6 Studi Kasus dan <i>Framework Hybrid</i>	265
BAB 8 <i>DEEP LEARNING</i> DAN <i>TRANSFER LEARNING</i>	273
8.1 Jaringan <i>Deep Feedforward</i>	273
8.2 <i>Autoencoders</i>	279

8.3 <i>Convolutional Neural Network</i>	285
8.4 <i>Recurrent Neural Network</i>	291
8.5 <i>Transfer Learning</i>	297
8.6 <i>Framework dan Library</i> Terkini.....	305

BAB 9 KOMPUTASI KUANTUM DAN KECERDASAN

KOMPUTASIONAL	311
9.1 Pengantar Komputasi Kuantum	311
9.2 Qubits dan Prinsip Dasar	317
9.3 <i>Quantum Machine Learning</i>	322
9.4 <i>Quantum Evolutionary Algorithm</i>	327
9.5 Perbandingan dengan Komputasi Klasik.....	333
9.6 Potensi Implementasi Masa Depan	338

BAB 10 KECERDASAN KOMPUTASIONAL UNTUK BIG

DATA DAN DATA STREAMING	345
10.1 Tantangan Komputasi dalam <i>Big Data</i>	345
10.2 Arsitektur dan <i>Tools Big Data</i>	350
10.3 <i>Real-time Data Analytics</i>	355
10.4 Penerapan <i>Machine Learning</i> dalam <i>Big Data</i>	362
10.5 <i>Online Learning</i>	367
10.6 Studi Kasus: Sistem Prediksi <i>Real-Time</i>	373

BAB 11 IMPLEMENTASI INDUSTRI DAN TRANSFORMASI

DIGITAL	379
11.1 Industri 4.0 dan <i>Society 5.0</i>	379
11.2 Penerapan di Manufaktur	385
11.3 <i>E-commerce</i> dan Rekomendasi	389
11.4 <i>Healthcare</i> dan Diagnostik Otomatis	395
11.5 Transportasi dan <i>Smart City</i>	400
11.6 Robotika dan IoT Cerdas.....	404

BAB 12 PLATFORM DAN ALAT PEMROGRAMAN

KECERDASAN KOMPUTASIONAL	411
12.1 Bahasa Pemrograman Populer	411
12.2 Pengenalan Python dan R.....	417
12.3 <i>Library: TensorFlow, PyTorch, Scikit-Learn</i>	419

12.4 <i>Framework Evolutionary</i> dan <i>Swarm</i>	421
12.5 Alat Visualisasi dan <i>Debugging</i>	423
12.6 Pengembangan Proyek Mini	429
BAB 13 EVALUASI DAN VALIDASI SISTEM KECERDASAN	
KOMPUTASIONAL	437
13.1 Ukuran Evaluasi Umum	437
13.2 Metode <i>Cross-Validation</i>	444
13.3 ROC Curve dan <i>Confusion Matrix</i>	452
13.4 <i>Overfitting</i> vs <i>Underfitting</i>	459
13.5 <i>Benchmarking</i> dan Dataset Standar	465
13.6 <i>Best Practices</i> dalam Eksperimen.....	471
BAB 14 ETIKA, PRIVASI, DAN MASA DEPAN KECERDASAN	
KOMPUTASIONAL	477
14.1 Isu Etika dan Bias Algoritma.....	477
14.2 Keamanan Sistem Otomatis.....	483
14.3 Perlindungan Data dan GDPR	488
14.4 Dampak Sosial dan Ekonomi	495
14.5 Masa Depan Dunia Kerja dan Kecerdasan.....	499
14.6 Outlook Riset dan Inovasi.....	504
GLOSARIUM	511
REFERENSI	523
PROFIL PENULIS	539

BAB 1

PENGANTAR KECERDASAN KOMPUTASIONAL

1.1 Definisi dan Ruang Lingkup

Kecerdasan Komputasional (KK) atau *Computational Intelligence (CI)* merupakan paradigma yang berkembang pesat dalam ilmu komputer dan kecerdasan buatan, yang berfokus pada pengembangan sistem cerdas yang mampu belajar, beradaptasi, dan menyelesaikan masalah kompleks di lingkungan yang tidak pasti atau berubah-ubah. Berbeda dengan Kecerdasan Buatan (AI) tradisional yang seringkali mengandalkan logika simbolik dan representasi pengetahuan eksplisit, KK lebih condong pada pendekatan yang terinspirasi dari biologi dan perilaku adaptif alamiah. Ini mencakup serangkaian metodologi dan teknik yang memungkinkan mesin untuk menunjukkan perilaku cerdas tanpa pemrograman eksplisit untuk setiap skenario yang mungkin terjadi.

Secara fundamental, KK dapat didefinisikan sebagai studi tentang sistem adaptif yang memungkinkan perilaku cerdas dalam lingkungan yang kompleks dan dinamis. Definisi ini menekankan pada kemampuan sistem untuk belajar dari data, beradaptasi terhadap perubahan, dan mengoptimalkan kinerjanya seiring waktu. Konsep ini pertama kali diperkenalkan oleh Bezdek pada awal 1990-an, yang membedakan KK dari AI simbolik dengan menekankan pada kemampuan sistem untuk menangani ketidakpastian, ketidaktepatan, dan kebenaran parsial (Bezdek, 1994). Sejak saat itu, ruang lingkup KK telah meluas secara signifikan, mencakup berbagai teknik dan algoritma yang terinspirasi dari proses biologis dan kognitif.

1.1.1 Pilar-Pilar Utama Kecerdasan Komputasional

Kecerdasan Komputasional dibangun di atas beberapa pilar utama yang saling melengkapi dan seringkali diintegrasikan untuk membentuk sistem yang lebih kuat. Pilar-pilar ini meliputi:

- **Jaringan Saraf Tiruan (JST):** Terinspirasi dari struktur dan fungsi otak biologis, JST adalah model komputasi yang terdiri dari unit-unit pemrosesan yang saling terhubung (neuron) yang mampu belajar dari data melalui penyesuaian bobot koneksi. JST sangat efektif dalam tugas-tugas pengenalan pola, klasifikasi, dan regresi. Contoh konkretnya adalah penggunaan *Convolutional Neural Networks (CNN)* dalam pengenalan gambar, di mana CNN dapat secara otomatis mempelajari fitur-fitur hierarkis dari gambar untuk mengidentifikasi objek atau wajah dengan akurasi tinggi (LeCun et al., 2015). Dalam bidang medis, CNN digunakan untuk mendeteksi penyakit dari citra medis seperti X-ray atau MRI, membantu dokter dalam diagnosis dini (Litjens et al., 2017).
- **Logika Fuzzy (Fuzzy Logic):** Logika fuzzy adalah pendekatan untuk penalaran yang memungkinkan nilai kebenaran parsial, berbeda dengan logika Boolean tradisional yang hanya mengenal nilai benar atau salah. Ini memungkinkan sistem untuk menangani ketidakpastian dan ambiguitas dalam data dan pengetahuan, meniru cara manusia berpikir dan membuat keputusan dalam situasi yang tidak pasti. Aplikasi logika fuzzy sangat luas, mulai dari sistem kontrol industri, seperti kontrol suhu pada oven atau sistem pengereman ABS pada mobil, hingga sistem pendukung keputusan dalam keuangan dan kedokteran (Zadeh, 1965). Misalnya, dalam sistem kontrol lalu lintas, logika fuzzy dapat digunakan untuk mengatur durasi lampu lalu lintas berdasarkan kepadatan kendaraan yang tidak pasti.
- **Komputasi Evolusioner (Evolutionary Computation):** Terinspirasi dari prinsip-prinsip evolusi biologis, komputasi evolusioner mencakup algoritma seperti algoritma genetika, strategi evolusi, dan pemrograman genetik. Algoritma ini mencari solusi optimal untuk masalah dengan mensimulasikan proses seleksi alam, mutasi, dan rekombinasi. Komputasi

evolusioner sangat efektif untuk masalah optimasi yang kompleks di mana ruang pencarian sangat besar dan tidak ada metode analitis yang jelas. Contohnya adalah optimasi desain antenna, penjadwalan produksi, atau perancangan tata letak pabrik (Eiben & Smith, 2015). Dalam bidang keuangan, algoritma genetika dapat digunakan untuk mengoptimalkan portofolio investasi dengan mempertimbangkan risiko dan keuntungan.

- **Sistem Imun Buatan (*Artificial Immune Systems - AIS*)**: AIS adalah paradigma komputasi yang terinspirasi oleh sistem kekebalan tubuh biologis, yang memiliki kemampuan untuk mengenali, mengingat, dan merespons patogen. AIS digunakan untuk deteksi anomali, optimasi, dan klasifikasi. Misalnya, dalam keamanan siber, AIS dapat digunakan untuk mendeteksi serangan *malware* atau intrusi jaringan dengan mengidentifikasi pola aktivitas yang tidak normal (De Castro & Timmis, 2002).
- **Kecerdasan Swarm (*Swarm Intelligence - SI*)**: SI adalah pendekatan yang terinspirasi oleh perilaku kolektif kelompok hewan sosial seperti koloni semut, kawanan burung, atau gerombolan ikan. Algoritma SI, seperti *Particle Swarm Optimization (PSO)* dan *Ant Colony Optimization (ACO)*, digunakan untuk memecahkan masalah optimasi dengan memanfaatkan interaksi sederhana antar agen dalam populasi. PSO, misalnya, telah berhasil diterapkan dalam optimasi fungsi, penjadwalan, dan perancangan jaringan (Kennedy & Eberhart, 1995). ACO sering digunakan untuk masalah *Traveling Salesperson Problem (TSP)* atau perutean kendaraan, di mana semut virtual mencari jalur terpendek dengan meninggalkan jejak feromon.

1.1.2 Ruang Lingkup Aplikasi Kecerdasan Komputasional

Ruang lingkup aplikasi Kecerdasan Komputasional sangat luas dan terus berkembang, mencakup hampir setiap sektor industri dan penelitian. Kemampuan KK untuk menangani data yang kompleks, tidak lengkap, dan tidak pasti menjadikannya alat yang sangat berharga untuk memecahkan masalah dunia nyata.

- **Pengenalan Pola dan Klasifikasi:** Ini adalah salah satu area aplikasi paling fundamental dari KK. JST, khususnya *Deep Learning*, telah merevolusi bidang pengenalan gambar, pengenalan suara, dan pemrosesan bahasa alami. Contohnya termasuk sistem pengenalan wajah pada *smartphone*, asisten suara seperti Siri atau Google Assistant, dan sistem terjemahan mesin (Goodfellow et al., 2016). Dalam bidang medis, KK digunakan untuk klasifikasi sel kanker dari citra mikroskopis atau diagnosis penyakit berdasarkan gejala pasien.
- **Optimasi dan Penjadwalan:** Algoritma komputasi evolusioner dan kecerdasan swarm sangat efektif dalam memecahkan masalah optimasi yang kompleks di berbagai domain. Ini termasuk optimasi rantai pasokan, penjadwalan produksi di pabrik, perutean kendaraan untuk logistik, dan optimasi desain produk (Yang, 2014). Misalnya, perusahaan logistik menggunakan algoritma ini untuk mengoptimalkan rute pengiriman, mengurangi biaya bahan bakar, dan meningkatkan efisiensi.
- **Sistem Kontrol Adaptif:** Logika fuzzy dan JST sering digunakan untuk mengembangkan sistem kontrol yang dapat beradaptasi dengan perubahan kondisi lingkungan atau parameter sistem. Ini terlihat pada sistem kontrol iklim di gedung pintar, kontrol robotika, dan sistem manajemen energi (Passino & Yurkovich, 1998). Dalam industri otomotif, sistem kontrol adaptif digunakan untuk mengelola kinerja mesin dan transmisi secara *real-time*.
- **Prediksi dan Peramalan:** KK digunakan secara ekstensif untuk memprediksi tren masa depan berdasarkan data historis. Ini mencakup peramalan harga saham, prediksi cuaca, peramalan permintaan produk, dan prediksi risiko kredit (Haykin, 2009). Model JST, khususnya *Recurrent Neural Networks (RNN)* dan *Long Short-Term Memory (LSTM)*, sangat cocok untuk data deret waktu.
- **Deteksi Anomali dan Keamanan Siber:** Sistem imun buatan dan JST digunakan untuk mengidentifikasi pola yang tidak biasa atau mencurigakan dalam data, yang dapat mengindikasikan penipuan, intrusi jaringan, atau kerusakan peralatan. Dalam

perbankan, KK membantu mendeteksi transaksi kartu kredit yang mencurigakan. Dalam keamanan siber, KK digunakan untuk mengidentifikasi serangan *phishing* atau *malware* baru.

- **Robotika dan Sistem Otonom:** KK memainkan peran krusial dalam pengembangan robotika dan sistem otonom, memungkinkan robot untuk belajar dari interaksi dengan lingkungannya, menavigasi di lingkungan yang kompleks, dan membuat keputusan secara mandiri. Ini termasuk mobil otonom, drone pengiriman, dan robot industri (Thrun et al., 2005).
- **Bioinformatika dan Biomedis:** Dalam bioinformatika, KK digunakan untuk analisis sekuens DNA dan protein, prediksi struktur protein, dan penemuan obat. Dalam biomedis, KK membantu dalam diagnosis penyakit, personalisasi pengobatan, dan analisis citra medis (Jiang et al., 2017).

1.1.3 Perbedaan dengan Kecerdasan Buatan Tradisional

Meskipun seringkali digunakan secara bergantian, penting untuk memahami perbedaan mendasar antara Kecerdasan Komputasional dan Kecerdasan Buatan (AI) tradisional. AI tradisional, yang sering disebut sebagai AI simbolik atau *Good Old-Fashioned AI (GOFAI)*, berfokus pada representasi pengetahuan eksplisit dan penalaran logis. Pendekatan ini melibatkan pemrograman aturan-aturan yang jelas dan basis pengetahuan yang terstruktur untuk memecahkan masalah. Contohnya adalah sistem pakar yang menggunakan aturan *if-then* untuk meniru penalaran seorang ahli.

Sebaliknya, Kecerdasan Komputasional mengambil pendekatan yang lebih *data-driven* dan *model-free*. KK tidak memerlukan model matematika eksplisit dari masalah yang dihadapi, melainkan belajar dari data dan beradaptasi dengan lingkungan. Ini membuatnya sangat cocok untuk masalah di mana model matematis sulit atau tidak mungkin untuk dirumuskan, atau di mana data sangat bising dan tidak lengkap. KK lebih toleran terhadap ketidakpastian dan ketidaktepatan, dan seringkali lebih kuat dalam menghadapi data dunia nyata yang kompleks.

Tabel 1.1.1 merangkum perbedaan utama antara Kecerdasan Komputasional dan Kecerdasan Buatan Tradisional.

Fitur Kecerdasan Komputasional Kecerdasan Buatan Tradisional
Pendekatan Data-driven, model-free, terinspirasi biologi Simbolik, berbasis aturan, representasi pengetahuan eksplisit **Penanganan Data** Toleran terhadap ketidakpastian, ketidaktepatan, bising Membutuhkan data yang bersih dan terstruktur **Pembelajaran** Adaptif, belajar dari data Berbasis pengetahuan yang diprogram secara eksplisit **Fleksibilitas** Sangat adaptif terhadap perubahan lingkungan Kurang adaptif, membutuhkan pembaruan aturan secara manual **Contoh Teknik** JST, Logika Fuzzy, Komputasi Evolusioner, SI, AIS Sistem Pakar, Logika Predikat, Pencarian Heuristik **Aplikasi Khas** Pengenalan pola, optimasi, kontrol adaptif, prediksi Penalaran logis, perencanaan, pemecahan masalah terstruktur

Meskipun ada perbedaan, penting untuk dicatat bahwa batas antara KK dan AI semakin kabur. Banyak sistem cerdas modern mengintegrasikan elemen-elemen dari kedua paradigma untuk mencapai kinerja yang optimal. Misalnya, sistem pakar dapat menggunakan JST untuk memproses data sensor, atau algoritma genetika dapat digunakan untuk mengoptimalkan basis aturan dalam sistem pakar. Konvergensi ini mencerminkan upaya untuk membangun sistem yang lebih cerdas dan tangguh yang dapat mengatasi kompleksitas dunia nyata.

1.1.4 Tantangan dan Arah Masa Depan

Meskipun telah mencapai kemajuan yang luar biasa, Kecerdasan Komputasional masih menghadapi beberapa tantangan. Salah satu tantangan utama adalah interpretasi dan penjelasan model. Banyak model KK, terutama JST yang dalam, seringkali dianggap sebagai kotak hitam karena sulit untuk memahami bagaimana mereka mencapai keputusan tertentu. Ini menjadi masalah dalam aplikasi kritis seperti medis atau keuangan, di mana transparansi dan akuntabilitas sangat penting. Penelitian dalam *Explainable AI (XAI)* bertujuan untuk mengatasi masalah ini dengan mengembangkan

metode untuk membuat model KK lebih dapat diinterpretasikan (Adadi & Berrada, 2018).

Tantangan lain adalah kebutuhan akan data yang besar dan berkualitas tinggi untuk melatih model KK, terutama dalam *deep learning*. Pengumpulan dan anotasi data bisa menjadi proses yang mahal dan memakan waktu. Selain itu, masalah *bias* dalam data pelatihan dapat menyebabkan model membuat keputusan yang tidak adil atau diskriminatif.

Arah masa depan Kecerdasan Komputasional kemungkinan akan melibatkan:

- ***Integrasi Multimodal***: Mengembangkan sistem yang dapat memproses dan mengintegrasikan informasi dari berbagai modalitas, seperti teks, gambar, suara, dan video, untuk pemahaman yang lebih komprehensif.
- ***Pembelajaran Reinforcement (Reinforcement Learning)***: Peningkatan penggunaan pembelajaran *reinforcement* untuk memungkinkan agen cerdas belajar melalui interaksi dengan lingkungan dan menerima umpan balik dalam bentuk hadiah atau hukuman.
- ***Kecerdasan Komputasional Berbasis Quantum***: Eksplorasi potensi komputasi kuantum untuk mempercepat dan meningkatkan kemampuan algoritma KK, terutama dalam optimasi dan pembelajaran mesin.
- ***Kecerdasan Komputasional yang Berpusat pada Manusia***: Pengembangan sistem KK yang lebih berpusat pada manusia, yang mempertimbangkan nilai-nilai etika, privasi, dan interaksi manusia-mesin yang intuitif.
- ***Edge AI dan Komputasi Terdistribusi***: Implementasi model KK pada perangkat *edge* dengan sumber daya terbatas, memungkinkan pemrosesan data secara lokal dan mengurangi latensi.

Dengan terus mengatasi tantangan-tantangan ini dan mengeksplorasi arah-arrah baru, Kecerdasan Komputasional akan

terus menjadi kekuatan pendorong di balik inovasi teknologi dan solusi untuk masalah-masalah paling mendesak di dunia.

1.2 Evolusi dan Sejarah Singkat

Kecerdasan Komputasional (KK) bukanlah konsep yang muncul secara tiba-tiba, melainkan hasil dari perjalanan panjang pemikiran dan inovasi dalam upaya memahami dan mereplikasi kecerdasan. Sejarahnya terjalin erat dengan perkembangan ilmu komputer, matematika, biologi, dan filsafat, membentuk sebuah disiplin ilmu yang dinamis dan terus berkembang. Untuk memahami esensi KK, penting untuk menelusuri akar sejarahnya, mengidentifikasi tonggak-tonggak penting, dan mengapresiasi bagaimana berbagai ide telah berkonvergensi membentuk lanskap KK modern.

1.2.1 Akar Filosofis dan Matematika

Jauh sebelum komputer digital ditemukan, para filsuf telah merenungkan sifat kecerdasan dan kemungkinan untuk mereplikasinya. Konsep *automata* atau mesin yang dapat melakukan tugas secara mandiri telah ada sejak zaman kuno, meskipun dalam bentuk yang sangat primitif. Namun, fondasi matematis yang lebih konkret mulai diletakkan pada abad ke-17 dengan karya Gottfried Wilhelm Leibniz. Leibniz membayangkan sebuah *calculus ratiocinator*, sebuah bahasa universal untuk penalaran yang dapat menyelesaikan masalah secara mekanis. Ide ini, meskipun belum dapat diimplementasikan pada masanya, merupakan prekursor penting bagi gagasan komputasi simbolik dan logika formal yang menjadi dasar KK.

Pada abad ke-19, George Boole mengembangkan aljabar Boolean, sebuah sistem logika yang menggunakan nilai biner (benar/salah) untuk merepresentasikan proposisi. Aljabar Boolean menjadi landasan fundamental bagi desain sirkuit digital dan, pada gilirannya, bagi semua sistem komputasi modern. Tanpa aljabar Boolean, pengembangan komputer seperti yang kita kenal saat ini tidak akan mungkin terjadi.

1.2.2 Era Mesin Komputasi Awal dan Teori Komputabilitas

Abad ke-20 menyaksikan kemunculan mesin komputasi pertama. Charles Babbage, pada pertengahan abad ke-19, merancang *Analytical Engine*, sebuah mesin mekanis yang memiliki banyak fitur komputer modern, termasuk unit aritmatika, memori, dan kemampuan pemrograman. Meskipun tidak pernah sepenuhnya dibangun pada masanya, konsep-konsep Babbage sangat visioner dan meletakkan dasar bagi arsitektur komputer.

Namun, terobosan teoretis yang paling signifikan datang pada tahun 1930-an dengan karya Alan Turing. Turing memperkenalkan konsep *Mesin Turing*, sebuah model abstrak komputasi yang dapat melakukan operasi apa pun yang dapat dihitung. Mesin Turing tidak hanya memberikan definisi formal tentang apa itu komputasi tetapi juga menunjukkan batasan-batasannya. Karyanya tentang *komputabilitas* dan *masalah penghentian* (halting problem) menjadi pilar teori komputasi dan secara tidak langsung memengaruhi pemahaman kita tentang apa yang dapat dan tidak dapat dicapai oleh sistem cerdas. Pada periode yang sama, Alonzo Church mengembangkan *lambda calculus*, sebuah sistem formal lain untuk komputasi yang setara dengan Mesin Turing.

1.2.3 Kelahiran Kecerdasan Buatan dan Jaringan Saraf Tiruan Awal

Istilah Kecerdasan Buatan (AI) pertama kali dicetuskan pada konferensi Dartmouth pada tahun 1956. Konferensi ini sering dianggap sebagai titik awal resmi bidang AI. Para peneliti seperti John McCarthy, Marvin Minsky, Allen Newell, dan Herbert Simon berkumpul untuk membahas kemungkinan membuat mesin yang dapat berpikir. Pada masa ini, fokus utama AI adalah pada *AI simbolik*, yang mencoba mereplikasi kecerdasan manusia melalui manipulasi simbol dan aturan logika. Contoh awal termasuk program *Logic Theorist* (Newell & Simon, 1956) yang dapat membuktikan teorema matematika, dan *General Problem Solver* (Newell, Shaw, & Simon, 1959) yang dirancang untuk memecahkan berbagai masalah dengan pendekatan heuristik.

Namun, paralel dengan perkembangan AI simbolik, ada juga upaya untuk meniru struktur otak manusia. Pada tahun 1943, Warren McCulloch dan Walter Pitts menerbitkan makalah seminal tentang *neuron buatan*, sebuah model matematis sederhana dari sel saraf biologis. Ini menjadi dasar bagi pengembangan *jaringan saraf tiruan* (JST) atau *neural networks*. Frank Rosenblatt kemudian mengembangkan *Perceptron* pada tahun 1957, sebuah JST sederhana yang mampu belajar untuk mengklasifikasikan pola. Meskipun Perceptron memiliki keterbatasan, terutama dalam memecahkan masalah non-linear, karyanya membuka jalan bagi penelitian lebih lanjut dalam JST.

1.2.4 Musim Dingin AI dan Kebangkitan Paradigma Baru

Setelah euforia awal, bidang AI mengalami apa yang dikenal sebagai musim dingin AI pada tahun 1970-an dan 1980-an. Keterbatasan komputasi, kurangnya data, dan kesulitan dalam mengatasi masalah dunia nyata yang kompleks menyebabkan penurunan minat dan pendanaan. Banyak janji awal AI tidak terpenuhi, dan optimisme mereda.

Namun, periode ini juga menjadi katalisator bagi munculnya paradigma baru yang kemudian akan membentuk Kecerdasan Komputasional. Para peneliti mulai menyadari bahwa pendekatan simbolik murni mungkin tidak cukup untuk menangani ketidakpastian dan kompleksitas dunia nyata. Ini membuka pintu bagi pendekatan yang terinspirasi dari biologi dan proses alam.

Pada tahun 1970-an, John Holland memperkenalkan *algoritma genetika* (AG), sebuah metode optimasi yang terinspirasi oleh proses seleksi alam dan evolusi biologis. AG menunjukkan potensi besar dalam memecahkan masalah optimasi yang kompleks dengan mencari solusi secara iteratif melalui mutasi, persilangan, dan seleksi.

Pada tahun 1980-an, Lotfi Zadeh mengembangkan *logika fuzzy*, sebuah kerangka kerja untuk penalaran dengan ketidakpastian dan informasi yang tidak tepat. Logika fuzzy memungkinkan sistem untuk menangani konsep-konsep yang ambigu, seperti panas atau

dingin, yang sulit direpresentasikan dengan logika biner tradisional. Ini sangat relevan untuk aplikasi di mana data tidak selalu jelas atau lengkap.

1.2.5 Konsolidasi dan Diferensiasi Kecerdasan Komputasional

Pada awal 1990-an, istilah Kecerdasan Komputasional mulai digunakan secara lebih luas untuk mengelompokkan pendekatan-pendekatan yang terinspirasi dari alam ini. Istilah ini sering dikaitkan dengan IEEE Computational Intelligence Society, yang secara resmi didirikan pada tahun 1990. KK mencakup Jaringan Saraf Tiruan, Logika Fuzzy, dan Algoritma Genetika sebagai tiga pilar utamanya. Perbedaan utama antara KK dan AI tradisional (simbolik) adalah bahwa KK cenderung berfokus pada:

- **Adaptasi dan Pembelajaran:** Sistem KK dirancang untuk belajar dari data dan beradaptasi dengan lingkungan yang berubah, daripada diprogram secara eksplisit dengan aturan.
- **Toleransi Terhadap Ketidakpastian:** KK secara inheren mampu menangani data yang bising, tidak lengkap, atau tidak tepat.
- **Inspirasi Biologis:** Banyak algoritma KK mengambil inspirasi langsung dari proses biologis atau fenomena alam.
- **Komputasi Numerik:** KK seringkali melibatkan komputasi numerik yang intensif, berbeda dengan manipulasi simbolik AI tradisional.

Pada periode ini, terjadi kebangkitan minat pada Jaringan Saraf Tiruan dengan munculnya algoritma *backpropagation* yang memungkinkan pelatihan JST multi-lapisan secara efisien. Ini membuka jalan bagi aplikasi JST yang lebih kompleks dalam pengenalan pola, visi komputer, dan pemrosesan bahasa alami.

1.2.6 Era Modern: Pembelajaran Mendalam dan Konvergensi

Abad ke-21 telah menyaksikan ledakan minat dan kemajuan dalam Kecerdasan Komputasional, terutama didorong oleh ketersediaan data besar (big data) dan peningkatan daya komputasi. Salah satu perkembangan paling signifikan adalah munculnya *pembelajaran*

mendalam (deep learning), sebuah sub-bidang dari Jaringan Saraf Tiruan yang menggunakan arsitektur JST dengan banyak lapisan (deep neural networks). Pembelajaran mendalam telah merevolusi bidang-bidang seperti visi komputer, pengenalan suara, dan pemrosesan bahasa alami, mencapai kinerja yang sebelumnya tidak terbayangkan.

Selain pembelajaran mendalam, bidang KK terus berkembang dengan munculnya berbagai algoritma baru yang terinspirasi dari alam, seperti *optimasi koloni semut* (ant colony optimization), *algoritma kawanan partikel* (particle swarm optimization), dan *algoritma lebah* (bee algorithm). Algoritma-algoritma ini menunjukkan efektivitas dalam memecahkan masalah optimasi yang kompleks di berbagai domain.

Saat ini, batas antara Kecerdasan Komputasional dan Kecerdasan Buatan menjadi semakin kabur. Banyak aplikasi AI modern mengintegrasikan teknik-teknik dari kedua bidang. Misalnya, sistem AI yang cerdas mungkin menggunakan pembelajaran mendalam (dari KK) untuk mengenali pola dalam data, dan kemudian menggunakan penalaran simbolik (dari AI tradisional) untuk membuat keputusan berdasarkan pola tersebut. Konvergensi ini mencerminkan pemahaman yang semakin mendalam bahwa kecerdasan, baik biologis maupun buatan, adalah fenomena multi-faceted yang membutuhkan berbagai pendekatan untuk direplikasi secara efektif.

Sejarah Kecerdasan Komputasional adalah kisah tentang inovasi, ketekunan, dan kemampuan untuk belajar dari alam. Dari ide-ide filosofis kuno hingga algoritma pembelajaran mendalam yang canggih, perjalanan ini terus membentuk masa depan teknologi dan masyarakat. Pemahaman yang kuat tentang evolusi ini sangat penting bagi siapa pun yang ingin berkontribusi pada bidang yang menarik ini.

1.3 Kecerdasan Komputasional vs. Kecerdasan Buatan

Dalam ranah ilmu komputer dan rekayasa, istilah Kecerdasan Buatan (AI) dan Kecerdasan Komputasional (CI) seringkali digunakan secara bergantian, namun keduanya memiliki perbedaan filosofis, metodologis, dan aplikatif yang signifikan. Memahami nuansa di antara keduanya sangat penting untuk mengapresiasi kontribusi unik masing-masing bidang terhadap kemajuan teknologi dan pemecahan masalah kompleks. Meskipun keduanya bertujuan untuk menciptakan sistem cerdas, pendekatan yang mereka ambil dan jenis masalah yang mereka tangani seringkali berbeda secara fundamental.

1.3.1 Akar Filosofis dan Pendekatan

Perbedaan mendasar antara Kecerdasan Buatan dan Kecerdasan Komputasional dapat ditelusuri kembali ke akar filosofis dan pendekatan yang mereka adopsi.

1.3.1.1 Kecerdasan Buatan (AI)

Secara historis, Kecerdasan Buatan (AI) berakar pada upaya untuk meniru kecerdasan manusia melalui penalaran simbolik dan logika formal. Pendekatan AI klasik, sering disebut sebagai *Good Old-Fashioned AI* (GOFAI), berfokus pada representasi pengetahuan eksplisit dan manipulasi simbol untuk memecahkan masalah. Ini melibatkan pengembangan sistem berbasis aturan, logika predikat, dan pohon keputusan yang mencoba meniru proses berpikir manusia secara *top-down*. Tujuannya adalah untuk menciptakan mesin yang dapat berpikir, belajar, dan bertindak seperti manusia, seringkali dengan penekanan pada kemampuan kognitif tingkat tinggi seperti penalaran, perencanaan, dan pemahaman bahasa alami (Russell & Norvig, 2020).

Sebagai contoh, sistem pakar adalah salah satu manifestasi awal AI yang sukses. Sistem ini dirancang untuk meniru kemampuan pengambilan keputusan seorang ahli manusia dalam domain

tertentu dengan menggunakan basis pengetahuan yang terdiri dari fakta dan aturan heuristik. Misalnya, sistem pakar medis dapat mendiagnosis penyakit berdasarkan gejala yang dimasukkan, mengikuti serangkaian aturan jika-maka yang telah ditentukan oleh dokter ahli. Pendekatan ini sangat efektif untuk masalah yang dapat diformalkan dengan baik dan memiliki domain pengetahuan yang terbatas.

1.3.1.2 Kecerdasan Komputasional (CI)

Sebaliknya, Kecerdasan Komputasional (CI) mengambil pendekatan yang lebih *bottom-up*, terinspirasi oleh biologi dan fenomena alam. CI tidak secara eksplisit mencoba meniru kecerdasan manusia, melainkan berfokus pada pengembangan sistem yang dapat belajar dan beradaptasi dari data, seringkali tanpa model eksplisit dari lingkungan atau masalah yang dihadapi. CI menekankan pada kemampuan adaptasi, pembelajaran, dan evolusi, seringkali melalui metode non-simbolik dan numerik. Bidang-bidang utama dalam CI meliputi jaringan saraf tiruan, logika fuzzy, komputasi evolusioner (algoritma genetika, pemrograman genetik), dan swarm intelligence (optimasi koloni semut, optimasi partikel swarm) (Engelbrecht, 2007).

Misalnya, jaringan saraf tiruan, yang terinspirasi oleh struktur otak biologis, belajar dengan menyesuaikan bobot koneksi antar neuron berdasarkan data pelatihan. Mereka tidak diprogram dengan aturan eksplisit, melainkan belajar untuk mengenali pola atau membuat prediksi melalui proses iteratif. Contoh lainnya adalah algoritma genetika, yang meniru proses seleksi alam untuk menemukan solusi optimal untuk masalah yang kompleks. Algoritma ini tidak memerlukan model matematika yang tepat dari masalah, melainkan mengeksplorasi ruang solusi secara heuristik.

1.3.2 Metodologi dan Karakteristik

Perbedaan dalam akar filosofis ini secara langsung mengarah pada perbedaan dalam metodologi dan karakteristik operasional kedua bidang.

1.3.2.1 Metodologi AI

Metodologi AI seringkali melibatkan:

- **Representasi Pengetahuan Simbolik:** Menggunakan simbol, logika, dan struktur data untuk merepresentasikan pengetahuan tentang dunia.
- **Penalaran Logis:** Menggunakan inferensi logis dan deduksi untuk menarik kesimpulan dari pengetahuan yang ada.
- **Perencanaan dan Pencarian:** Mengembangkan algoritma untuk mencari solusi optimal dalam ruang keadaan yang terdefinisi dengan baik.
- **Keterjelasan (Explainability):** Sistem AI klasik seringkali lebih mudah dijelaskan karena keputusan didasarkan pada aturan dan logika yang dapat dilacak.

Studi kasus yang relevan adalah pengembangan sistem catur Deep Blue oleh IBM yang mengalahkan Garry Kasparov. Deep Blue menggunakan pendekatan pencarian ruang keadaan yang masif, mengevaluasi jutaan posisi catur per detik, dikombinasikan dengan basis pengetahuan yang luas tentang strategi catur. Meskipun mengesankan, kemampuannya sangat spesifik untuk domain catur dan tidak mudah digeneralisasi ke masalah lain.

1.3.2.2 Metodologi CI

Metodologi CI, di sisi lain, dicirikan oleh:

- **Pembelajaran dari Data:** Menggunakan data untuk melatih model dan menemukan pola tersembunyi tanpa pemrograman eksplisit.
- **Adaptasi dan Evolusi:** Sistem dapat beradaptasi dengan perubahan lingkungan dan berevolusi untuk menemukan solusi yang lebih baik.
- **Toleransi Terhadap Ketidakpastian:** Mampu menangani data yang bising, tidak lengkap, atau tidak pasti, seringkali melalui penggunaan logika fuzzy atau probabilitas.
- **Komputasi Paralel dan Terdistribusi:** Banyak algoritma CI secara inheren paralel, memungkinkan pemrosesan data dalam skala besar.

- ***Kurangnya Keterjelasan (Lack of Explainability)***: Model CI, terutama jaringan saraf dalam, seringkali dianggap sebagai kotak hitam karena sulit untuk memahami bagaimana mereka mencapai keputusan tertentu.

Sebagai contoh, dalam pengenalan gambar, jaringan saraf konvolusional (CNN) yang merupakan bagian dari CI, dilatih dengan jutaan gambar berlabel. CNN belajar secara otomatis untuk mengekstrak fitur-fitur relevan dari gambar (tepi, tekstur, bentuk) tanpa perlu programmer secara eksplisit mendefinisikan fitur-fitur tersebut. Kemampuan adaptif ini memungkinkan CNN untuk mencapai kinerja yang luar biasa dalam tugas-tugas pengenalan objek, deteksi wajah, dan segmentasi gambar.

1.3.3 Konvergensi dan Sinergi

Meskipun ada perbedaan yang jelas, batas antara AI dan CI semakin kabur seiring waktu. Banyak aplikasi modern menggabungkan elemen dari kedua bidang untuk mencapai kinerja yang lebih baik. Konvergensi ini sering disebut sebagai Kecerdasan Hibrida atau Sistem Cerdas Hibrida.

Misalnya, dalam sistem rekomendasi, algoritma CI seperti jaringan saraf dapat digunakan untuk memodelkan preferensi pengguna dari data historis, sementara aturan berbasis AI dapat digunakan untuk menyaring rekomendasi berdasarkan kriteria tertentu atau batasan domain. Demikian pula, dalam robotika, AI dapat digunakan untuk perencanaan jalur tingkat tinggi dan penalaran simbolik, sementara CI (misalnya, algoritma evolusioner atau logika fuzzy) dapat digunakan untuk kontrol motorik tingkat rendah dan adaptasi terhadap lingkungan yang tidak terduga (Abraham et al., 2006).

Studi kasus yang menonjol adalah pengembangan mobil otonom. Sistem ini mengintegrasikan berbagai komponen AI dan CI. Pengenalan objek (pejalan kaki, kendaraan lain, rambu lalu lintas) seringkali ditangani oleh jaringan saraf dalam (CI). Perencanaan jalur dan pengambilan keputusan tingkat tinggi (misalnya, kapan harus berbelok, kapan harus mengerem) mungkin melibatkan algoritma AI

berbasis aturan atau penalaran logis. Kontrol kendaraan yang adaptif terhadap kondisi jalan yang berubah dapat menggunakan logika fuzzy (CI). Sinergi antara pendekatan-pendekatan ini memungkinkan mobil otonom untuk beroperasi secara efektif dalam lingkungan yang kompleks dan dinamis.

1.3.4 Implikasi Praktis dan Aplikasi

Perbedaan antara AI dan CI juga memiliki implikasi praktis dalam pemilihan alat dan teknik untuk masalah tertentu.

- **AI lebih cocok untuk masalah yang terstruktur dengan baik**, di mana pengetahuan domain dapat direpresentasikan secara eksplisit dan aturan penalaran dapat didefinisikan dengan jelas. Contohnya termasuk sistem pakar, penjadwalan, dan permainan papan dengan aturan yang jelas.
- **CI lebih unggul dalam menangani masalah yang tidak terstruktur, bising, atau dinamis**, di mana model eksplisit sulit dibangun dan pembelajaran dari data sangat penting. Contohnya termasuk pengenalan pola (gambar, suara), prediksi deret waktu, optimasi, dan kontrol adaptif.

Dalam konteks industri 4.0, kedua bidang ini memainkan peran krusial. AI digunakan untuk optimasi rantai pasokan, pemeliharaan prediktif berbasis aturan, dan sistem pengambilan keputusan cerdas. Sementara itu, CI digunakan untuk analisis data sensor dari mesin, deteksi anomali, kontrol kualitas adaptif, dan robotika kolaboratif yang belajar dari interaksi (Liao et al., 2017).

1.3.5 Tantangan dan Arah Masa Depan

Meskipun telah mencapai kemajuan yang signifikan, baik AI maupun CI menghadapi tantangan masing-masing. Tantangan utama AI klasik adalah skalabilitas dan kemampuan untuk menangani ketidakpastian dan data yang tidak lengkap. Sementara itu, tantangan CI seringkali terletak pada kurangnya keterjelasan model (kotak hitam) dan kebutuhan akan data pelatihan yang besar.

Arah masa depan kemungkinan akan melihat peningkatan konvergensi dan pengembangan sistem hibrida yang lebih canggih.

Penelitian akan terus berfokus pada peningkatan keterjelasan model CI, pengembangan algoritma pembelajaran yang lebih efisien dengan data terbatas, dan integrasi penalaran simbolik dengan pembelajaran berbasis data. Selain itu, etika dan tata kelola AI dan CI akan menjadi area penelitian yang semakin penting, memastikan bahwa sistem cerdas dikembangkan dan digunakan secara bertanggung jawab (Hagras, 2018).

Secara keseluruhan, baik Kecerdasan Buatan maupun Kecerdasan Komputasional adalah pilar penting dalam bidang ilmu komputasi cerdas. Memahami perbedaan dan sinergi di antara keduanya memungkinkan para peneliti dan praktisi untuk memilih pendekatan yang paling tepat untuk masalah yang dihadapi, mendorong inovasi, dan membangun sistem cerdas yang lebih kuat dan adaptif untuk masa depan.

1.4 Penerapan di Dunia Nyata

Kecerdasan Komputasional (KC) telah bertransformasi dari konsep teoretis menjadi pendorong inovasi yang tak terpisahkan dalam berbagai sektor kehidupan. Kemampuannya untuk belajar dari data, beradaptasi dengan lingkungan yang berubah, dan menemukan solusi optimal untuk masalah kompleks telah membuka jalan bagi aplikasi yang sebelumnya dianggap fiksi ilmiah. Bagian ini akan mengulas secara mendalam berbagai penerapan KC di dunia nyata, dilengkapi dengan studi kasus dan contoh konkret untuk memberikan gambaran yang komprehensif.

1.4.1 Kesehatan dan Kedokteran

Penerapan KC dalam bidang kesehatan dan kedokteran telah merevolusi cara diagnosis, pengobatan, dan manajemen pasien dilakukan. Salah satu area paling signifikan adalah dalam *diagnosis penyakit*. Algoritma pembelajaran mesin, khususnya jaringan saraf tiruan (JST), mampu menganalisis citra medis seperti MRI, CT scan, dan X-ray dengan akurasi yang seringkali melebihi kemampuan dokter manusia dalam mendeteksi anomali kecil yang mungkin terlewatkan. Misalnya, dalam deteksi kanker, sistem KC dapat dilatih

dengan ribuan citra tumor dan non-tumor untuk mengidentifikasi pola-pola mikroskopis yang mengindikasikan keberadaan sel kanker pada tahap awal, meningkatkan peluang keberhasilan pengobatan (Esteva et al., 2017).

Selain itu, KC juga berperan penting dalam *penemuan obat baru*. Proses penemuan obat secara tradisional sangat mahal dan memakan waktu. Dengan menggunakan algoritma genetika dan optimasi berbasis swarm, peneliti dapat mensimulasikan interaksi molekuler dan memprediksi efektivitas senyawa obat potensial, mempercepat identifikasi kandidat obat yang menjanjikan dan mengurangi biaya penelitian (Vamathevan et al., 2019). Dalam *personalisasi pengobatan*, KC memungkinkan dokter untuk menyesuaikan rencana perawatan berdasarkan profil genetik, riwayat kesehatan, dan respons individu pasien terhadap terapi tertentu. Ini mengarah pada pengobatan yang lebih efektif dan meminimalkan efek samping.

1.4.2 Keuangan dan Ekonomi

Sektor keuangan telah menjadi salah satu pengguna terbesar teknologi KC, terutama dalam *analisis pasar dan prediksi*. Jaringan saraf tiruan dan sistem *fuzzy logic* digunakan untuk menganalisis data pasar yang sangat besar dan kompleks, mengidentifikasi pola-pola tersembunyi, dan memprediksi pergerakan harga saham, mata uang, atau komoditas. Meskipun tidak ada sistem yang dapat memprediksi pasar dengan sempurna, KC dapat memberikan keunggulan kompetitif dengan mengidentifikasi tren dan anomali yang tidak terlihat oleh analisis tradisional (Guresen et al., 2011).

Deteksi penipuan adalah area lain di mana KC sangat efektif. Bank dan lembaga keuangan menggunakan algoritma pembelajaran mesin untuk memantau transaksi secara *real-time*, mengidentifikasi pola-pola perilaku yang mencurigakan yang mungkin mengindikasikan aktivitas penipuan kartu kredit, pencucian uang, atau penipuan asuransi. Sistem ini belajar dari data historis penipuan dan terus beradaptasi dengan modus operandi baru para penipu. Selain itu, dalam *manajemen risiko*, KC membantu lembaga keuangan menilai

risiko kredit, mengoptimalkan portofolio investasi, dan mengelola eksposur terhadap volatilitas pasar.

1.4.3 Manufaktur dan Otomasi Industri

Dalam industri manufaktur, KC telah menjadi tulang punggung *otomasi cerdas* dan *Industri 4.0*. Robotika cerdas yang ditenagai oleh algoritma KC mampu melakukan tugas-tugas kompleks dengan presisi tinggi, meningkatkan efisiensi produksi, dan mengurangi kesalahan manusia. Contohnya adalah robot kolaboratif (cobots) yang bekerja bersama manusia di lini perakitan, beradaptasi dengan perubahan tugas dan lingkungan kerja (Wang et al., 2019).

Pemeliharaan prediktif adalah aplikasi penting lainnya. Sensor yang terpasang pada mesin dan peralatan mengumpulkan data tentang kinerja, suhu, getaran, dan parameter lainnya. Algoritma KC menganalisis data ini untuk memprediksi kapan suatu komponen kemungkinan akan rusak, memungkinkan pemeliharaan dilakukan sebelum terjadi kegagalan, mengurangi waktu henti produksi yang tidak terencana dan menghemat biaya. Selain itu, dalam *optimasi rantai pasokan*, KC membantu perusahaan mengelola inventaris, merencanakan rute pengiriman, dan mengoptimalkan jadwal produksi untuk meminimalkan biaya dan memaksimalkan efisiensi.

1.4.4 Transportasi dan Logistik

KC telah membawa perubahan signifikan dalam sektor transportasi dan logistik, terutama dalam pengembangan *kendaraan otonom*. Mobil tanpa pengemudi menggunakan kombinasi sensor, kamera, radar, dan algoritma KC untuk memahami lingkungan sekitar, mendeteksi objek, merencanakan jalur, dan mengambil keputusan mengemudi secara *real-time*. Meskipun masih dalam tahap pengembangan dan pengujian, kendaraan otonom berpotensi meningkatkan keselamatan jalan, mengurangi kemacetan, dan meningkatkan efisiensi bahan bakar (Badue et al., 2021).

Dalam *manajemen lalu lintas*, KC digunakan untuk mengoptimalkan aliran lalu lintas di kota-kota besar. Sistem cerdas dapat menganalisis data lalu lintas historis dan *real-time* dari sensor dan kamera untuk

menyesuaikan lampu lalu lintas, mengalihkan rute, dan memberikan informasi kepada pengemudi untuk mengurangi kemacetan. Selain itu, dalam *logistik dan pengiriman*, algoritma KC mengoptimalkan rute pengiriman, mengelola armada kendaraan, dan memprediksi permintaan untuk memastikan pengiriman barang yang efisien dan tepat waktu.

1.4.5 Energi dan Lingkungan

Penerapan KC dalam sektor energi dan lingkungan berfokus pada *efisiensi energi* dan *manajemen sumber daya*. Dalam *jaringan listrik cerdas (smart grids)*, KC digunakan untuk memprediksi permintaan energi, mengoptimalkan distribusi listrik, dan mengintegrasikan sumber energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin secara lebih efisien. Ini membantu mengurangi pemborosan energi dan meningkatkan stabilitas jaringan.

Dalam *pemantauan lingkungan*, sensor yang dilengkapi dengan KC dapat mendeteksi polutan udara dan air, memantau perubahan iklim, dan melacak populasi satwa liar. Algoritma pembelajaran mesin menganalisis data ini untuk mengidentifikasi tren, memprediksi dampak lingkungan, dan mendukung pengambilan keputusan untuk konservasi dan mitigasi. Misalnya, dalam *prediksi cuaca*, model KC dapat memproses data meteorologi yang sangat besar untuk menghasilkan prakiraan cuaca yang lebih akurat dan tepat waktu.

1.4.6 Pendidikan

Meskipun seringkali kurang disorot, KC juga memiliki potensi besar dalam merevolusi pendidikan. *Sistem pembelajaran adaptif* yang ditenagai oleh KC dapat menyesuaikan materi pelajaran, kecepatan belajar, dan gaya pengajaran dengan kebutuhan individu setiap siswa. Ini memungkinkan pengalaman belajar yang lebih personal dan efektif, mengidentifikasi area di mana siswa kesulitan dan memberikan dukungan yang ditargetkan.

Selain itu, KC dapat digunakan untuk *penilaian otomatis* tugas dan ujian, membebaskan waktu guru untuk fokus pada interaksi siswa.

Dalam *analisis kinerja siswa*, algoritma KC dapat mengidentifikasi pola-pola dalam data akademik untuk memprediksi siswa yang berisiko putus sekolah atau membutuhkan intervensi tambahan, memungkinkan institusi pendidikan untuk memberikan dukungan proaktif.

1.4.7 Pertanian Cerdas (Smart Agriculture)

Pertanian cerdas adalah bidang lain yang mendapatkan manfaat besar dari KC. *Pertanian presisi* menggunakan sensor, drone, dan citra satelit yang dianalisis oleh algoritma KC untuk memantau kesehatan tanaman, tingkat kelembaban tanah, dan kebutuhan nutrisi secara *real-time*. Ini memungkinkan petani untuk mengoptimalkan penggunaan air, pupuk, dan pestisida, mengurangi limbah dan meningkatkan hasil panen.

Robot pertanian yang dilengkapi dengan KC dapat melakukan tugas-tugas seperti penanaman, penyiraman, pemanenan, dan bahkan penyiangan gulma secara otonom, mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manual dan meningkatkan efisiensi. Selain itu, dalam *prediksi hasil panen*, model KC dapat menganalisis data historis cuaca, kondisi tanah, dan praktik pertanian untuk memprediksi hasil panen dengan akurasi yang lebih tinggi, membantu petani membuat keputusan yang lebih baik tentang penanaman dan pemasaran.

1.4.8 Hiburan dan Media

Dalam industri hiburan dan media, KC digunakan untuk *sistem rekomendasi* yang mempersonalisasi pengalaman pengguna. Platform streaming seperti Netflix dan Spotify menggunakan algoritma pembelajaran mesin untuk menganalisis preferensi pengguna dan merekomendasikan film, acara TV, atau musik yang relevan. Ini meningkatkan keterlibatan pengguna dan kepuasan.

Pembuatan konten otomatis adalah area yang berkembang pesat. Algoritma KC dapat menghasilkan berita, ringkasan olahraga, atau bahkan musik dan seni berdasarkan data yang ada. Meskipun masih dalam tahap awal, potensi untuk menghasilkan konten yang unik dan menarik secara otomatis sangat besar. Selain itu, dalam *analisis*

sentimen, KC dapat menganalisis ulasan pengguna dan komentar media sosial untuk memahami opini publik tentang produk, layanan, atau acara, memberikan wawasan berharga bagi perusahaan dan pembuat konten.

Penerapan Kecerdasan Komputasional di dunia nyata terus berkembang pesat, dengan inovasi baru muncul secara konstan. Kemampuannya untuk memecahkan masalah kompleks, mengotomatisasi tugas, dan memberikan wawasan yang mendalam menjadikannya alat yang sangat berharga di berbagai sektor. Seiring dengan kemajuan teknologi dan peningkatan ketersediaan data, kita dapat mengharapkan untuk melihat aplikasi KC yang lebih canggih dan transformatif di masa depan.

1.5 Tantangan dan Peluang

Kecerdasan Komputasional (KC) telah berkembang pesat, menawarkan solusi inovatif untuk berbagai masalah kompleks di berbagai sektor. Namun, seiring dengan potensi transformatifnya, bidang ini juga dihadapkan pada serangkaian tantangan signifikan yang memerlukan perhatian serius dari para peneliti, pengembang, dan pembuat kebijakan. Memahami tantangan-tantangan ini dan mengidentifikasi peluang yang muncul adalah krusial untuk memastikan pengembangan KC yang bertanggung jawab, etis, dan berkelanjutan.

1.5.1 Tantangan dalam Pengembangan dan Penerapan Kecerdasan Komputasional

Pengembangan dan penerapan KC tidaklah tanpa hambatan. Beberapa tantangan utama yang perlu diatasi meliputi:

1.5.1.1 Keterbatasan Data dan Kualitas Data

Salah satu fondasi utama sebagian besar algoritma KC, terutama dalam pembelajaran mesin, adalah ketersediaan data yang besar dan berkualitas tinggi. Namun, dalam banyak domain, data yang relevan mungkin langka, tidak lengkap, atau bias. Misalnya, dalam pengembangan sistem diagnosis medis berbasis KC, data pasien yang

representatif dan teranotasi dengan baik seringkali sulit diperoleh karena masalah privasi, kerahasiaan, dan biaya pengumpulan. Data yang bias dapat menyebabkan model KC membuat keputusan yang tidak adil atau diskriminatif, memperburuk ketidaksetaraan yang ada dalam masyarakat (Mehrabi et al., 2021). Selain itu, data yang bising atau tidak konsisten dapat mengurangi akurasi dan keandalan model KC, membatasi efektivitasnya dalam aplikasi dunia nyata.

1.5.1.2 Kompleksitas Model dan Interpretasi

Banyak model KC modern, terutama jaringan saraf tiruan yang dalam (deep neural networks), dikenal sebagai kotak hitam karena kompleksitas internalnya yang tinggi. Sulit untuk memahami bagaimana model-model ini mencapai keputusan atau prediksi tertentu. Kurangnya interpretasi ini menjadi tantangan serius, terutama dalam aplikasi kritis seperti perawatan kesehatan, keuangan, atau sistem hukum, di mana transparansi dan akuntabilitas sangat penting. Misalnya, jika sebuah sistem KC merekomendasikan penolakan pinjaman kepada seseorang, penting untuk dapat menjelaskan alasan di balik keputusan tersebut. Tanpa interpretasi yang jelas, kepercayaan publik terhadap sistem KC dapat terkikis, dan adopsi yang lebih luas dapat terhambat (Rudin, 2019).

1.5.1.3 Keamanan dan Privasi

Seiring dengan meningkatnya penggunaan KC dalam mengelola data sensitif, masalah keamanan dan privasi menjadi semakin mendesak. Sistem KC rentan terhadap berbagai serangan siber, termasuk serangan permusuhan (adversarial attacks) di mana input yang sedikit dimodifikasi dapat menyebabkan model membuat kesalahan fatal. Misalnya, sebuah tanda berhenti yang sedikit dimodifikasi dapat disalahartikan oleh sistem penglihatan komputer pada mobil otonom, berpotensi menyebabkan kecelakaan. Selain itu, pengumpulan dan pemrosesan data dalam skala besar oleh sistem KC menimbulkan kekhawatiran serius tentang privasi individu. Memastikan bahwa data pribadi dilindungi dan digunakan secara etis adalah tantangan yang kompleks, memerlukan kerangka kerja regulasi yang kuat dan teknologi privasi yang canggih (Li et al., 2020).

1.5.1.4 Etika dan Tanggung Jawab

Pengembangan dan penerapan KC memunculkan pertanyaan etika yang mendalam. Siapa yang bertanggung jawab ketika sistem KC membuat kesalahan atau menyebabkan kerugian? Bagaimana kita memastikan bahwa sistem KC dirancang dan digunakan untuk kebaikan bersama, bukan untuk tujuan yang merugikan? Isu-isu seperti bias algoritmik, diskriminasi, pengangguran akibat otomatisasi, dan potensi penyalahgunaan teknologi untuk pengawasan massal atau manipulasi sosial memerlukan pertimbangan etis yang cermat. Mengembangkan kerangka kerja etika yang komprehensif dan mekanisme akuntabilitas adalah esensial untuk memandu pengembangan KC yang bertanggung jawab (Floridi et al., 2018).

1.5.1.5 Keterbatasan Sumber Daya Komputasi

Beberapa algoritma KC, terutama model pembelajaran mendalam yang sangat besar, memerlukan daya komputasi yang sangat besar untuk pelatihan dan inferensi. Ini dapat menjadi penghalang bagi peneliti dan organisasi dengan sumber daya terbatas. Ketergantungan pada perangkat keras khusus seperti GPU (Graphics Processing Unit) dan TPU (Tensor Processing Unit) juga dapat membatasi aksesibilitas dan meningkatkan biaya pengembangan. Mengembangkan algoritma KC yang lebih efisien secara komputasi dan memanfaatkan infrastruktur komputasi awan secara efektif adalah tantangan yang berkelanjutan.

1.5.2 Peluang Inovasi dan Dampak Positif

Meskipun ada tantangan, bidang KC juga menawarkan peluang luar biasa untuk inovasi dan dampak positif di berbagai sektor.

1.5.2.1 Peningkatan Efisiensi dan Produktivitas

KC memiliki potensi untuk secara signifikan meningkatkan efisiensi dan produktivitas di berbagai industri. Dalam manufaktur, robot kolaboratif yang didukung KC dapat bekerja bersama manusia untuk mengotomatisasi tugas-tugas berulang dan berbahaya, meningkat-

kan kecepatan produksi dan mengurangi kesalahan. Dalam logistik, algoritma optimasi KC dapat merencanakan rute pengiriman yang paling efisien, mengurangi biaya bahan bakar dan waktu pengiriman. Di sektor keuangan, sistem KC dapat mengotomatisasi deteksi penipuan, memproses transaksi lebih cepat, dan memberikan rekomendasi investasi yang dipersonalisasi.

1.5.2.2 Solusi untuk Masalah Sosial dan Lingkungan

KC dapat menjadi alat yang ampuh untuk mengatasi beberapa masalah sosial dan lingkungan paling mendesak di dunia. Dalam perawatan kesehatan, KC dapat membantu dalam penemuan obat baru, diagnosis penyakit dini, dan pengembangan rencana perawatan yang dipersonalisasi. Misalnya, algoritma pembelajaran mendalam telah menunjukkan keberhasilan dalam mendeteksi kanker dari gambar medis dengan akurasi yang sebanding atau bahkan melebihi dokter manusia (Esteva et al., 2017). Dalam pertanian, KC dapat mengoptimalkan penggunaan air dan pupuk, memprediksi hasil panen, dan mendeteksi penyakit tanaman, berkontribusi pada ketahanan pangan. Untuk masalah lingkungan, KC dapat digunakan untuk memantau perubahan iklim, memprediksi bencana alam, dan mengoptimalkan penggunaan energi terbarukan.

1.5.2.3 Personalisasi dan Pengalaman Pengguna yang Ditingkatkan

KC memungkinkan tingkat personalisasi yang belum pernah terjadi sebelumnya dalam produk dan layanan. Sistem rekomendasi yang didukung KC dapat menyarankan film, musik, atau produk yang sesuai dengan preferensi individu, meningkatkan pengalaman pengguna. Dalam pendidikan, platform pembelajaran adaptif yang menggunakan KC dapat menyesuaikan materi pelajaran dan kecepatan belajar dengan kebutuhan setiap siswa, memaksimalkan potensi mereka. Asisten virtual cerdas dapat memberikan dukungan yang dipersonalisasi dan responsif, meningkatkan interaksi manusia-komputer.

1.5.2.4 Penemuan Ilmiah dan Penelitian

KC telah menjadi katalisator penting untuk penemuan ilmiah di berbagai disiplin ilmu. Dalam biologi, KC digunakan untuk menganalisis data genomik yang kompleks, memprediksi struktur protein, dan mempercepat penemuan obat. Dalam fisika, KC membantu dalam simulasi material baru dan analisis data dari eksperimen berskala besar. Kemampuan KC untuk mengidentifikasi pola tersembunyi dalam kumpulan data yang besar dan kompleks membuka jalan bagi wawasan baru dan terobosan ilmiah yang sebelumnya tidak mungkin dicapai.

1.5.2.5 Penciptaan Lapangan Kerja Baru dan Transformasi Ekonomi

Meskipun ada kekhawatiran tentang otomatisasi yang menggantikan pekerjaan, KC juga menciptakan lapangan kerja baru dan mendorong transformasi ekonomi. Permintaan akan ilmuwan data, insinyur pembelajaran mesin, dan spesialis etika AI terus meningkat. Selain itu, KC memungkinkan munculnya model bisnis baru dan industri yang sama sekali baru, mendorong pertumbuhan ekonomi dan inovasi. Fokus pada pengembangan keterampilan yang relevan dengan era KC akan menjadi kunci untuk memanfaatkan peluang ini.

1.5.3 Menuju Masa Depan yang Bertanggung Jawab dan Berkelanjutan

Untuk memaksimalkan peluang dan mengatasi tantangan KC, diperlukan pendekatan multidisiplin yang melibatkan kolaborasi antara akademisi, industri, pemerintah, dan masyarakat sipil. Investasi dalam penelitian dan pengembangan yang berfokus pada interpretasi model, keamanan, dan etika sangat penting. Pengembangan kerangka kerja regulasi yang adaptif dan berwawasan ke depan juga diperlukan untuk memastikan bahwa KC digunakan secara bertanggung jawab dan adil. Dengan mengatasi tantangan-tantangan ini secara proaktif, kita dapat memanfaatkan potensi penuh Kecerdasan Komputasional untuk membangun masa depan yang lebih cerdas, lebih efisien, dan lebih inklusif bagi semua.

1.6 Arah dan Tren Masa Depan

Kecerdasan Komputasional (KC) telah berkembang pesat sejak awal kemunculannya, bertransformasi dari konsep teoretis menjadi pilar fundamental dalam berbagai inovasi teknologi. Seiring dengan kemajuan komputasi dan ketersediaan data yang melimpah, KC terus berevolusi, membuka jalan bagi aplikasi yang semakin canggih dan transformatif. Bagian ini akan mengulas arah dan tren masa depan KC, menyoroti area penelitian yang menjanjikan, teknologi yang muncul, serta implikasi sosial dan etika yang perlu dipertimbangkan.

1.6.1 Konvergensi dengan Bidang Lain

Salah satu tren paling signifikan dalam KC adalah konvergensi yang semakin erat dengan bidang ilmu lain. KC tidak lagi berdiri sendiri, melainkan menjadi komponen integral dalam disiplin ilmu seperti biologi, kedokteran, material science, dan bahkan humaniora.

1.6.1.1 Bio-inspirasi dan Komputasi Neuromorfik

Inspirasi dari sistem biologis, khususnya otak manusia, terus menjadi motor penggerak inovasi dalam KC. Komputasi neuromorfik, misalnya, berupaya meniru arsitektur dan fungsi otak pada tingkat perangkat keras. Chip neuromorfik, seperti Loihi dari Intel, dirancang untuk memproses informasi secara paralel dan efisien, mirip dengan neuron dan sinapsis. Pendekatan ini menjanjikan efisiensi energi yang jauh lebih tinggi dan kemampuan untuk menangani tugas-tugas yang kompleks seperti pengenalan pola dan pembelajaran adaptif dengan cara yang lebih alami (Davies et al., 2018).

Lebih jauh, penelitian tentang *brain-computer interfaces* (BCI) yang didukung oleh KC memungkinkan komunikasi langsung antara otak manusia dan perangkat eksternal. Ini membuka peluang revolusioner dalam bidang prostetik, rehabilitasi, dan bahkan augmentasi kognitif. Algoritma KC berperan penting dalam menerjemahkan sinyal otak menjadi perintah yang dapat dimengerti oleh mesin, serta dalam mengadaptasi sistem terhadap variabilitas individu.

1.6.1.2 Kecerdasan Komputasional dalam Ilmu Material dan Kimia

KC semakin banyak digunakan untuk mempercepat penemuan material baru dengan sifat-sifat yang diinginkan. Algoritma pembelajaran mesin dapat menganalisis data eksperimen dan simulasi untuk memprediksi struktur material, sifat-sifatnya, dan bahkan merancang material baru secara *in silico*. Pendekatan ini secara signifikan mengurangi waktu dan biaya yang dibutuhkan dalam proses penelitian dan pengembangan material (Jain et al., 2016).

Dalam kimia, KC digunakan untuk memprediksi reaksi kimia, merancang molekul obat, dan mengoptimalkan proses sintesis. Jaringan saraf tiruan dan algoritma genetika dapat mengeksplorasi ruang kimia yang luas untuk menemukan kandidat molekul dengan aktivitas biologis tertentu atau sifat katalitik yang unggul.

1.6.2 Peningkatan Kemampuan Adaptasi dan Pembelajaran Berkelanjutan

Masa depan KC akan ditandai oleh sistem yang semakin adaptif dan mampu belajar secara berkelanjutan dari lingkungan yang dinamis.

1.6.2.1 Pembelajaran Seumur Hidup (Lifelong Learning)

Sistem KC saat ini seringkali dilatih pada dataset statis dan mengalami katastrofik forgetting ketika dihadapkan pada tugas-tugas baru. Pembelajaran seumur hidup bertujuan untuk mengembangkan agen KC yang dapat terus belajar dari pengalaman baru tanpa melupakan pengetahuan yang telah diperoleh sebelumnya. Ini sangat penting untuk aplikasi di dunia nyata di mana lingkungan terus berubah dan data baru terus muncul (Parisi et al., 2019).

1.6.2.2 Pembelajaran Reinforcement Adaptif

Pembelajaran reinforcement (RL) telah menunjukkan keberhasilan luar biasa dalam berbagai domain, dari permainan hingga robotika. Tren masa depan akan melibatkan pengembangan algoritma RL yang

lebih adaptif, mampu belajar dari interaksi yang terbatas, dan beradaptasi dengan perubahan dalam dinamika lingkungan. Ini akan memungkinkan robot dan agen otonom untuk beroperasi secara efektif di lingkungan yang tidak terstruktur dan tidak dapat diprediksi.

1.6.3 Kecerdasan Komputasional yang Dapat Dijelaskan (Explainable AI - XAI)

Seiring dengan meningkatnya kompleksitas model KC, terutama jaringan saraf dalam, muncul kebutuhan mendesak untuk memahami bagaimana model-model ini membuat keputusan. Kecerdasan Komputasional yang Dapat Dijelaskan (XAI) adalah bidang penelitian yang berfokus pada pengembangan metode dan teknik untuk membuat model KC lebih transparan dan dapat diinterpretasikan.

1.6.3.1 Interpretasi Model dan Visualisasi

Penelitian XAI berupaya mengembangkan teknik untuk mengidentifikasi fitur-fitur input yang paling berpengaruh terhadap keputusan model, serta untuk memvisualisasikan proses pengambilan keputusan internal. Ini sangat penting dalam aplikasi kritis seperti diagnosis medis, sistem keuangan, dan kendaraan otonom, di mana pemahaman tentang alasan di balik keputusan sangatlah vital (Adadi & Berrada, 2018).

1.6.3.2 Keadilan dan Etika dalam KC

Aspek keadilan dan etika menjadi semakin penting dalam pengembangan KC. Model yang tidak transparan dapat mewarisi bias dari data pelatihan, yang mengarah pada keputusan yang tidak adil atau diskriminatif. XAI memainkan peran krusial dalam mengidentifikasi dan mengurangi bias ini, memastikan bahwa sistem KC beroperasi secara adil dan bertanggung jawab.

1.6.4 Kecerdasan Komputasional Terdistribusi dan Terdesentralisasi

Dengan semakin banyaknya perangkat yang terhubung dan data yang dihasilkan di *edge*, KC akan bergerak menuju arsitektur yang lebih terdistribusi dan terdesentralisasi.

1.6.4.1 Pembelajaran Federasi (Federated Learning)

Pembelajaran federasi memungkinkan pelatihan model KC pada data yang terdistribusi di banyak perangkat lokal tanpa perlu mengumpulkan data mentah ke server pusat. Ini memiliki implikasi besar untuk privasi data dan keamanan, karena data sensitif tetap berada di perangkat pengguna. Tren ini akan memungkinkan pengembangan aplikasi KC yang lebih personal dan aman, terutama di bidang kesehatan dan perangkat seluler (Konečný et al., 2016).

1.6.4.2 Kecerdasan Komputasional di Edge

Komputasi *edge* melibatkan pemrosesan data lebih dekat ke sumbernya, mengurangi latensi dan bandwidth yang dibutuhkan untuk transmisi data ke *cloud*. Mengintegrasikan kemampuan KC ke perangkat *edge* akan memungkinkan aplikasi real-time yang lebih responsif, seperti kendaraan otonom, drone, dan perangkat IoT pintar. Ini juga akan mengurangi ketergantungan pada konektivitas internet yang konstan.

1.6.5 Kecerdasan Komputasional dan Kreativitas

Salah satu area yang paling menarik dan menantang dalam KC adalah kemampuannya untuk menghasilkan konten kreatif.

1.6.5.1 Generative Adversarial Networks (GANs) dan Model Generatif Lainnya

Model generatif, seperti Generative Adversarial Networks (GANs), telah menunjukkan kemampuan luar biasa dalam menghasilkan gambar, musik, teks, dan bahkan video yang realistis. Tren masa depan akan melihat peningkatan dalam kualitas dan kontrol atas

konten yang dihasilkan, membuka peluang baru dalam seni, desain, hiburan, dan bahkan penelitian ilmiah (Goodfellow et al., 2014).

1.6.5.2 Kecerdasan Komputasional dalam Desain dan Seni

KC semakin digunakan sebagai alat bantu dalam proses desain dan kreasi artistik. Algoritma generatif dapat membantu desainer mengeksplorasi ruang desain yang luas, menghasilkan variasi ide, dan mengoptimalkan solusi berdasarkan kriteria tertentu. Dalam seni, KC dapat menciptakan karya seni orisinal, mengkomposisi musik, atau bahkan menulis puisi, menantang definisi tradisional tentang kreativitas.

1.6.6 Tantangan dan Implikasi Etika

Meskipun prospek masa depan KC sangat menjanjikan, ada sejumlah tantangan dan implikasi etika yang perlu diatasi.

1.6.6.1 Keamanan dan Privasi Data

Dengan semakin banyaknya data yang digunakan oleh sistem KC, masalah keamanan dan privasi data menjadi semakin krusial. Pengembangan teknik privasi yang kuat, seperti privasi diferensial dan komputasi multi-pihak yang aman, akan menjadi area penelitian yang penting.

1.6.6.2 Bias dan Keadilan Algoritma

Seperti yang telah disebutkan, bias dalam data pelatihan dapat menyebabkan keputusan yang tidak adil atau diskriminatif oleh sistem KC. Mengembangkan metode untuk mendeteksi, mengukur, dan mengurangi bias ini adalah tantangan etika yang mendesak.

1.6.6.3 Pengangguran Struktural dan Perubahan Sosial

Penyebaran KC yang luas berpotensi menyebabkan perubahan signifikan dalam pasar tenaga kerja, dengan otomatisasi yang menggantikan pekerjaan rutin. Masyarakat perlu mempersiapkan diri untuk perubahan ini melalui pendidikan ulang, pelatihan keterampilan baru, dan pengembangan jaring pengaman sosial.

1.6.6.4 Pengawasan dan Kontrol

Kemampuan KC untuk menganalisis dan memprediksi perilaku manusia menimbulkan kekhawatiran tentang pengawasan massal dan hilangnya privasi. Penting untuk mengembangkan kerangka kerja regulasi dan etika yang kuat untuk memastikan bahwa teknologi ini digunakan secara bertanggung jawab dan untuk kebaikan masyarakat.

Secara keseluruhan, arah dan tren masa depan Kecerdasan Komputasional menunjukkan bidang yang dinamis dan terus berkembang, dengan potensi untuk merevolusi hampir setiap aspek kehidupan manusia. Namun, untuk mewujudkan potensi ini secara bertanggung jawab, diperlukan pendekatan multidisiplin yang mempertimbangkan tidak hanya kemajuan teknologi, tetapi juga implikasi sosial, etika, dan filosofisnya.

GLOSARIUM

- **Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS):** Sebuah sistem inferensi *fuzzy* berbasis jaringan adaptif yang mengintegrasikan prinsip jaringan saraf tiruan dan logika *fuzzy* untuk memetakan parameter input yang tidak diketahui ke outputnya dengan memperoleh aturan dari data yang telah dilihat sebelumnya;
- **Akurasi:** Proporsi total prediksi yang benar, merupakan ukuran intuitif yang dapat menyesatkan pada dataset tidak seimbang;
- **Algoritma Evolusioner (AE):** Metaheuristik optimasi yang terinspirasi dari proses evolusi biologis alami, meniru mekanisme seleksi alam untuk menemukan solusi optimal atau mendekati optimal untuk masalah-masalah kompleks;
- **Ant Colony Optimization (ACO):** Sebuah metaheuristik berbasis populasi yang terinspirasi oleh perilaku pencarian makanan semut, di mana semut buatan membangun solusi untuk masalah optimasi dengan meninggalkan jejak feromon virtual pada jalur yang lebih baik;
- **Artificial Intelligence (AI):** Cabang ilmu komputer yang memungkinkan mesin dan sistem untuk belajar dari data, membuat keputusan, dan melakukan tugas-tugas yang biasanya membutuhkan kecerdasan manusia, berperan krusial dalam optimasi rantai pasokan, kontrol kualitas otomatis, dan pemeliharaan prediktif dalam konteks Industri 4.0;
- **AUC-ROC (Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve):** Metrik evaluasi yang mengukur kemampuan model klasifikasi untuk membedakan antara kelas positif dan negatif pada berbagai ambang batas, dengan nilai berkisar dari 0 hingga 1;

- **Backward Propagation:** Proses dalam pembelajaran jaringan saraf tiruan untuk menghitung gradien fungsi kerugian terhadap setiap bobot dan bias, dengan menyebarkan kesalahan dari lapisan keluaran kembali ke lapisan masukan menggunakan aturan rantai kalkulus;
- **Bias Algoritma:** Kecenderungan sistem Kecerdasan Buatan (AI) untuk menghasilkan hasil yang secara sistematis tidak adil atau diskriminatif terhadap kelompok atau individu tertentu, seringkali berasal dari data pelatihan yang bias, desain sistem, atau interaksi manusia;
- **Bias Data:** Bias yang terjadi ketika data yang digunakan untuk melatih model AI tidak representatif terhadap populasi yang akan dilayani oleh sistem, atau mengandung bias historis/sosial, sehingga menyebabkan keluaran yang tidak akurat atau diskriminatif;
- **Bias Interaksi:** Bias yang muncul dari cara manusia berinteraksi dengan sistem AI, di mana pengguna secara tidak sengaja dapat memperkenalkan bias melalui umpan balik atau cara mereka menggunakan sistem;
- **Bias Konfirmasi:** Kecenderungan manusia untuk mencari, menafsirkan, dan mengingat informasi yang mengkonfirmasi keyakinan atau hipotesis yang sudah ada, yang dalam konteks AI dapat memengaruhi pemilihan data atau metrik evaluasi;
- **Big Data:** Fenomena di mana volume data yang dihasilkan, disimpan, dan diproses tumbuh secara eksponensial, ditandai oleh volume, kecepatan, dan varietas yang masif, serta memiliki nilai potensial jika dianalisis dengan benar;
- **C++:** Bahasa pemrograman tingkat rendah yang menawarkan kinerja ekstrem dan kontrol memori presisi, sering digunakan untuk implementasi *backend* pustaka pembelajaran mesin dan sistem *embedded* yang membutuhkan kecepatan eksekusi maksimum;
- **Clustering:** Proses dalam *unsupervised learning* yang mengelompokkan titik data sehingga titik data dalam kelompok yang sama lebih mirip satu sama lain daripada titik data di

kelompok lain, bertujuan untuk menemukan struktur intrinsik dalam data tanpa informasi label sebelumnya;

- **Cross-Validation:** Teknik validasi model yang membagi dataset menjadi beberapa subset (fold) untuk melatih dan menguji model secara berulang, guna mendapatkan estimasi kinerja yang lebih andal dan mengurangi risiko *overfitting*;
- **Crossover (Rekombinasi):** Operator genetika yang menggabungkan informasi genetik dari dua atau lebih individu orang tua untuk menghasilkan satu atau lebih individu keturunan, meniru proses rekombinasi genetik dalam biologi;
- **Cyber-Physical Systems (CPS):** Sistem yang mengintegrasikan komputasi dan proses fisik, memungkinkan interaksi mulus antara dunia fisik dan digital di mana mesin dan proses fisik dapat dikendalikan serta dipantau secara digital, dan data dari dunia fisik digunakan untuk menginformasikan keputusan di dunia digital;
- **Defuzzifikasi:** Proses mengubah output himpunan fuzzy menjadi nilai numerik *crisp* yang dapat digunakan oleh sistem kontrol atau aplikasi lainnya, seringkali melalui metode seperti Centroid atau Mean of Maxima;
- **Derajat Keanggotaan:** Nilai numerik dalam rentang 0 hingga 1 yang menunjukkan sejauh mana suatu elemen menjadi anggota parsial dari suatu himpunan fuzzy, di mana 0 berarti tidak ada keanggotaan dan 1 berarti keanggotaan penuh;
- **Desentralisasi:** Karakteristik utama dalam sistem *swarm intelligence* di mana tidak ada agen pusat yang mengontrol atau mengarahkan perilaku seluruh *swarm*, melainkan setiap agen beroperasi secara independen berdasarkan aturan lokal yang sederhana;
- **Deep Feedforward Network (DFFN):** Arsitektur dasar jaringan saraf tiruan di mana informasi bergerak satu arah dari lapisan masukan melalui lapisan tersembunyi menuju lapisan keluaran, efektif untuk mempelajari representasi data abstrak dalam tugas klasifikasi dan regresi;
- **Dimensionality Reduction:** Proses mengurangi jumlah variabel acak yang dipertimbangkan dengan mendapatkan sekumpulan

variabel utama, berguna untuk menyederhanakan data sambil mempertahankan informasi yang paling penting, terutama pada dataset dengan banyak fitur;

- **Elitisme:** Mekanisme dalam Algoritma Evolusioner di mana individu-individu terbaik dari generasi saat ini secara langsung disalin ke generasi berikutnya tanpa melalui operator genetika, untuk mempertahankan kualitas solusi;
- **Ensemble Learning:** Metode dalam pembelajaran mesin yang menggabungkan beberapa model pembelajaran untuk mencapai solusi prediksi yang lebih baik dan akurat dibandingkan dengan menggunakan satu model saja, dengan tujuan meningkatkan keakuratan dan keandalan;
- **Entanglement:** Fenomena mekanika kuantum di mana dua atau lebih partikel kuantum menjadi saling terkait sehingga keadaan satu partikel tidak dapat dijelaskan secara independen dari keadaan partikel lainnya, bahkan jika terpisah jauh;
- **F1-Score:** Rata-rata harmonik dari presisi dan *recall*, digunakan sebagai metrik evaluasi untuk menyeimbangkan kedua ukuran tersebut, terutama pada dataset yang tidak seimbang;
- **Filter Bubble:** Situasi isolasi intelektual yang terjadi ketika sistem rekomendasi dan kurasi algoritmik secara selektif menyajikan informasi kepada pengguna berdasarkan preferensi dan riwayat daring mereka, sehingga membatasi paparan terhadap sudut pandang yang beragam;
- **Forward Propagation:** Fase dalam pembelajaran DFFN di mana data masukan dilewatkan melalui jaringan dari lapisan masukan hingga lapisan keluaran, dengan setiap neuron menghitung keluarannya berdasarkan bobot, bias, dan fungsi aktivasi untuk menghasilkan prediksi jaringan;
- **Fungsi Aktivasi:** Fungsi non-linear yang diterapkan pada keluaran setiap neuron setelah penjumlahan berbobot dan penambahan bias, krusial untuk memungkinkan jaringan mempelajari hubungan kompleks dan non-linear dalam data;
- **Fungsi Fitness:** Ukuran kuantitatif yang mengevaluasi kualitas setiap individu dalam populasi, mengukur seberapa baik suatu individu memecahkan masalah yang diberikan;

- **Fungsi Keanggotaan (Membership Function):** Kurva matematis yang mendefinisikan bagaimana setiap titik dalam domain dipetakan ke derajat keanggotaan dalam himpunan fuzzy, merepresentasikan tingkat keanggotaan suatu elemen secara grafis;
- **Fuzzifikasi:** Proses mengubah input *crisp* (nilai numerik yang tepat) menjadi nilai fuzzy (derajat keanggotaan dalam himpunan fuzzy) dengan menerapkan fungsi keanggotaan yang sesuai;
- **Fuzzy-ANN:** Pendekatan *hybrid* yang menggabungkan jaringan saraf tiruan (ANN) dengan logika *fuzzy*, memanfaatkan kemampuan belajar ANN dari data dan kemampuan penalaran linguistik serta penanganan ketidakpastian dari logika *fuzzy*;
- **GA-ANN:** Model *hybrid* yang mengintegrasikan algoritma genetika (GA) dengan jaringan saraf tiruan (ANN) untuk mengoptimalkan berbagai aspek ANN, seperti arsitektur jaringan, bobot koneksi, atau parameter pembelajaran, guna meningkatkan kinerja prediksi atau klasifikasi;
- **Gerbang Kuantum:** Operasi dasar yang diterapkan pada qubit untuk melakukan komputasi, analog dengan gerbang logika klasik tetapi beroperasi pada keadaan superposisi dan entanglement;
- **Hadoop Distributed File System (HDFS):** Sistem file terdistribusi yang dirancang untuk menyimpan data dalam skala besar dengan mendistribusikannya di banyak node komputasi, mengatasi tantangan volume data yang masif;
- **Himpunan Fuzzy (Fuzzy Set):** Perluasan dari himpunan klasik yang memungkinkan elemen untuk memiliki derajat keanggotaan parsial, merepresentasikan informasi yang tidak pasti atau tidak tepat;
- **Hybrid Paralel:** Konfigurasi sistem *hybrid* di mana beberapa komponen komputasi bekerja secara independen atau semi-independen pada masalah yang sama, kemudian hasilnya digabungkan atau diintegrasikan untuk meningkatkan akurasi dan ketahanan;
- **Industri 4.0:** Revolusi industri keempat yang mengintegrasikan teknologi digital dan fisik untuk mengubah proses manufaktur

dan industri secara fundamental, berpusat pada penciptaan pabrik pintar melalui konvergensi berbagai teknologi canggih;

- **Interferensi Kuantum:** Fenomena di mana gelombang probabilitas yang terkait dengan keadaan kuantum dapat saling menguatkan (konstruktif) atau melemahkan (destruktif), dimanfaatkan dalam komputasi kuantum untuk memperkuat jalur solusi yang benar;
- **Internet of Things (IoT):** Jaringan perangkat fisik yang tertanam dengan sensor, perangkat lunak, dan teknologi lain untuk tujuan menghubungkan dan bertukar data dengan perangkat dan sistem lain melalui internet, memungkinkan mesin dan peralatan di lantai pabrik untuk mengumpulkan dan berbagi data secara *real-time*;
- **Jaringan Saraf Tiruan (JST):** Model komputasi yang terinspirasi dari struktur otak biologis, terdiri dari unit-unit pemrosesan yang saling terhubung (neuron) yang mampu belajar dari data melalui penyesuaian bobot koneksi, efektif untuk pengenalan pola, klasifikasi, dan regresi;
- **Java:** Bahasa pemrograman *platform-independent* yang dikenal karena kinerja tinggi dan skalabilitasnya, sering digunakan untuk membangun sistem Kecerdasan Komputasional berskala besar dan aplikasi *enterprise*;
- **Julia:** Bahasa pemrograman *open-source* yang dirancang untuk komputasi ilmiah dan numerik berkinerja tinggi, mengatasi masalah dua bahasa dengan menawarkan sintaksis yang ekspresif dan kecepatan eksekusi mendekati C;
- **Kecerdasan Komputasional (KK):** Paradigma dalam ilmu komputer dan kecerdasan buatan yang berfokus pada pengembangan sistem cerdas yang mampu belajar, beradaptasi, dan menyelesaikan masalah kompleks di lingkungan yang tidak pasti atau berubah-ubah, dengan pendekatan yang terinspirasi dari biologi dan perilaku adaptif alamiah;
- **Kecerdasan Komputasional Hybrid:** Paradigma dalam kecerdasan komputasional yang mengintegrasikan dua atau lebih metode, model, atau paradigma komputasi yang berbeda untuk memanfaatkan kekuatan masing-masing dan mengatasi

keterbatasan individu, dengan tujuan menciptakan sistem yang lebih cerdas, efisien, dan efektif;

- **Kecerdasan Swarm (Swarm Intelligence - SI):** Pendekatan komputasi yang terinspirasi oleh perilaku kolektif kelompok hewan sosial, menggunakan interaksi sederhana antar agen dalam populasi untuk memecahkan masalah optimasi;
- **Klasifikasi:** Jenis masalah dalam *supervised learning* yang melibatkan prediksi label kategori diskrit, di mana output yang diprediksi termasuk dalam salah satu dari beberapa kelas yang telah ditentukan sebelumnya;
- **Komputasi Evolusioner (Evolutionary Computation):** Serangkaian algoritma yang terinspirasi dari prinsip-prinsip evolusi biologis, seperti algoritma genetika, untuk mencari solusi optimal masalah dengan mensimulasikan proses seleksi alam, mutasi, dan rekombinasi;
- **Komputasi Kuantum:** Paradigma komputasi baru yang memanfaatkan prinsip-prinsip mekanika kuantum seperti superposisi, entanglement, dan interferensi untuk memproses informasi;
- **Logika Fuzzy (Fuzzy Logic):** Pendekatan penalaran yang memungkinkan nilai kebenaran parsial, berbeda dengan logika Boolean tradisional, untuk menangani ketidakpastian dan ambiguitas dalam data dan pengetahuan;
- **MapReduce:** Model pemrograman yang menjadi fondasi untuk pemrosesan *batch* data besar, diimplementasikan dalam Apache Hadoop, yang membagi tugas pemrosesan ke banyak node secara paralel;
- **Matriks Kebingungan (Confusion Matrix):** Matriks yang merangkum kinerja model klasifikasi dengan membandingkan kelas yang diprediksi dengan kelas aktual, menampilkan True Positives, True Negatives, False Positives, dan False Negatives;
- **Metrik Keadilan (Fairness Metrics):** Ukuran kuantitatif yang digunakan untuk menilai apakah algoritma memperlakukan kelompok yang berbeda secara adil dan untuk mengidentifikasi serta mengukur bias dalam sistem AI;

- **Multilayer Perceptron (MLP):** Salah satu arsitektur jaringan saraf tiruan populer yang digunakan untuk klasifikasi dan regresi, terdiri dari lapisan masukan, lapisan tersembunyi, dan lapisan keluaran;
- **Mutasi:** Operator genetika yang memperkenalkan perubahan acak kecil pada gen individu, meniru mutasi genetik spontan dalam biologi untuk menjaga keragaman genetik dan mencegah konvergensi prematur;
- **Online Learning:** Pendekatan pembelajaran mesin di mana model terus-menerus diperbarui saat data baru tiba, memungkinkan sistem untuk beradaptasi dengan perubahan pola data secara *real-time*;
- **Overfitting:** Kondisi di mana model belajar terlalu banyak dari data pelatihan, termasuk *noise* dan detail tidak relevan, sehingga kinerjanya buruk pada data baru yang tidak terlihat;
- **Pabrik Pintar (Smart Factories):** Konsep inti dari Industri 4.0 di mana mesin, sistem, dan produk dapat berkomunikasi satu sama lain secara mandiri melalui integrasi teknologi digital dan fisik, meningkatkan efisiensi dan produktivitas manufaktur;
- **Particle Swarm Optimization (PSO):** Algoritma optimasi berbasis populasi yang terinspirasi oleh perilaku sosial kawanan burung atau sekolah ikan, di mana setiap partikel merepresentasikan solusi potensial dan bergerak melalui ruang pencarian berdasarkan pengalaman terbaiknya sendiri (*pbest*) dan pengalaman terbaik dari seluruh *swarm* (*gbest*);
- **Pembelajaran Reinforcement (Reinforcement Learning):** Paradigma pembelajaran mesin di mana agen cerdas belajar melalui interaksi dengan lingkungan dan menerima umpan balik dalam bentuk hadiah atau hukuman untuk mencapai tujuan tertentu;
- **Pengaturan Diri (Self-Organization):** Fenomena di mana perilaku kolektif yang kompleks muncul dari interaksi lokal antar agen dalam *swarm* tanpa adanya instruksi eksplisit dari luar, sering disebut sebagai *emergence*;

- **Populasi:** Kumpulan solusi potensial yang menjadi objek operasi Algoritma Evolusioner, di mana setiap solusi dalam populasi disebut individu atau kromosom;
- **PSO-Fuzzy:** Sistem cerdas *hybrid* yang menggabungkan konsep logika *fuzzy* dengan optimasi *swarm* partikel (PSO), di mana algoritma PSO digunakan untuk mengoptimalkan parameter pengontrol logika *fuzzy* guna meningkatkan kemampuan belajar otomatis;
- **Python:** Bahasa pemrograman serbaguna dengan sintaksis sederhana dan ekosistem pustaka yang kaya, menjadikannya *lingua franca* untuk riset dan pengembangan prototipe dalam Kecerdasan Buatan dan Kecerdasan Komputasional;
- **PyTorch:** Kerangka kerja pembelajaran mendalam yang dikembangkan oleh Facebook (sekarang Meta), memungkinkan pembangunan dan pelatihan jaringan saraf tiruan yang kompleks untuk berbagai aplikasi Kecerdasan Komputasional;
- **Qubit:** Unit dasar informasi dalam komputasi kuantum, yang dapat berada dalam superposisi keadaan 0 dan 1 secara bersamaan, berbeda dengan bit klasik yang hanya dapat berada dalam keadaan 0 atau 1;
- **R:** Bahasa pemrograman yang populer di kalangan statistikawan dan ilmuwan data, sangat kuat untuk analisis statistik, visualisasi data, dan pemodelan statistik dalam tahap awal proyek Kecerdasan Komputasional;
- **Real-time Data Analytics:** Proses analisis data yang terjadi secara instan atau dalam waktu yang sangat singkat setelah data dihasilkan, krusial untuk aplikasi yang membutuhkan respons cepat seperti deteksi penipuan;
- **Regresi:** Jenis masalah dalam *supervised learning* yang melibatkan prediksi nilai output kontinu, di mana model memprediksi nilai numerik daripada kategori diskrit;
- **Scikit-learn:** Pustaka komprehensif dalam Python untuk berbagai algoritma pembelajaran mesin klasik, menyediakan alat yang mudah digunakan untuk regresi, klasifikasi, *clustering*, dan analisis data awal;

- **Seleksi:** Operator dalam Algoritma Evolusioner yang memilih individu-individu dari populasi saat ini yang akan menjadi orang tua untuk generasi berikutnya, berdasarkan nilai fitness mereka;
- **Sirkuit Kuantum:** Representasi grafis dari urutan operasi gerbang kuantum yang diterapkan pada qubit untuk melakukan komputasi kompleks;
- **Sistem Hybrid Serial:** Jenis pendekatan *hybrid* di mana *output* dari satu komponen komputasi menjadi *input* untuk komponen berikutnya dalam urutan tertentu, sering digunakan dalam alur kerja pemrosesan data atau pengambilan keputusan multi-tahap;
- **Sistem Imun Buatan (Artificial Immune Systems - AIS):** Paradigma komputasi yang terinspirasi oleh sistem kekebalan tubuh biologis, digunakan untuk deteksi anomali, optimasi, dan klasifikasi dengan kemampuan mengenali, mengingat, dan merespons patogen data;
- **Sistem Inferensi Fuzzy (Fuzzy Inference System - FIS):** Kerangka kerja komputasi yang menggunakan Logika Fuzzy untuk memetakan input ke output, terdiri dari komponen fuzzifikasi, basis pengetahuan, mesin inferensi, dan defuzzifikasi;
- **Society 5.0:** Visi masyarakat yang berpusat pada manusia yang menyeimbangkan kemajuan ekonomi dengan penyelesaian masalah sosial melalui integrasi sistem ruang siber dan ruang fisik, bertujuan menciptakan masyarakat super cerdas di mana teknologi canggih digunakan untuk meningkatkan kualitas hidup setiap individu;
- **Stream Processing:** Teknologi yang memungkinkan data dianalisis saat sedang bergerak, bukan setelah disimpan, dirancang untuk menangani kecepatan data yang tinggi dalam aplikasi *Big Data*;
- **Superposisi:** Prinsip fundamental mekanika kuantum yang menyatakan bahwa sebuah sistem kuantum, seperti qubit, dapat berada dalam beberapa keadaan sekaligus sampai diukur;
- **Supervised Learning:** Pendekatan pembelajaran mesin di mana algoritma dilatih menggunakan dataset yang telah diberi label, yang berarti setiap titik data dalam dataset pelatihan memiliki output atau target yang sesuai yang diketahui;

- **Swarm Intelligence (SI):** Bidang studi yang terinspirasi dari perilaku kolektif sistem terdesentralisasi dan mengatur diri sendiri, baik alami maupun buatan, yang terdiri dari banyak agen sederhana yang berinteraksi satu sama lain dan dengan lingkungannya untuk menunjukkan perilaku cerdas yang kompleks;
- **TensorFlow:** Kerangka kerja pembelajaran mendalam yang dikembangkan oleh Google, memungkinkan pembangunan dan pelatihan jaringan saraf tiruan yang kompleks, mulai dari *Convolutional Neural Networks* hingga *Recurrent Neural Networks* dan *Transformers*;
- **Underfitting:** Situasi di mana model terlalu sederhana dan tidak dapat menangkap pola dalam data, menghasilkan kinerja yang rendah baik pada data pelatihan maupun data validasi;
- **Unsupervised Learning:** Pendekatan pembelajaran mesin yang berurusan dengan data tidak berlabel, di mana algoritma tidak diberikan output atau target yang telah ditentukan sebelumnya, dengan tujuan menemukan pola, struktur, atau hubungan tersembunyi dalam data itu sendiri;
- **Vanishing/Exploding Gradients:** Masalah dalam pelatihan jaringan saraf tiruan yang dalam, di mana gradien menjadi sangat kecil (*vanishing*) atau sangat besar (*exploding*) saat menyebar mundur, menghambat atau mengganggu pembaruan bobot di lapisan awal;
- **Explainable AI (XAI):** Serangkaian proses dan metode dalam Kecerdasan Buatan yang bertujuan untuk membuat keputusan dan keluaran algoritma AI lebih transparan, dapat dipahami, dan dipercaya oleh pengguna manusia;
- **3V (Volume, Velocity, Variety):** Tiga karakteristik utama *Big Data* yang secara inheren menimbulkan tantangan komputasi mendasar, mencakup volume data yang masif, kecepatan generasi data, dan beragamnya jenis serta format data.

REFERENSI

1. Abraham, A., Hassanien, A. E., & Peters, J. F. (Eds.). (2006). *Computational Intelligence in Control*. Springer.
2. Adadi, A., & Berrada, M. (2018). *Peeking inside the black-box: A survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI)*. *IEEE Access*, 6, 52138-52160.
3. Badue, C., Guidolini, R., De Souza, A. F., & De Barros, R. S. M. (2021). Self-driving cars: A survey. *Expert Systems with Applications*, 165, 113812.
4. Bezdek, J. C. (1994). *What is computational intelligence?* In *Computational Intelligence: A Dynamic System Perspective* (pp. 1-12). IEEE Press.
5. Davies, M., Srinivasa, N., Lin, T. H., China, G., Cao, Y., Choday, S.,... & Wang, J. (2018). *Loihi: A neuromorphic manycore processor with on-chip learning*. *IEEE Micro*, 38(3), 82-99.
6. De Castro, L. N., & Timmis, J. (2002). *Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Paradigm*. Springer.
7. Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2015). *Introduction to Evolutionary Computing* (2nd ed.). Springer.
8. Engelbrecht, A. P. (2007). *Computational Intelligence: An Introduction* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
9. Esteva, A., Kuprel, B., Novoa, R. A., Ko, J., Swetter, S. M., Limbrock, H. M., & Thrun, S. (2017). *Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks*. *Nature*, 542(7639), 115-118.
10. Floridi, L., Cowls, J., Beltrametti, M., Chatila, R., Chazerand, P., Dignum, V.,... & Schafer, B. (2018). *AI4People—An ethical framework for a good AI society: Opportunities, risks, principles, and recommendations*. *Minds and Machines*, 28(4), 689-707.

11. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
12. Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S.,... & Bengio, Y. (2014). *Generative adversarial nets*. *Advances in neural information processing systems*, 27.
13. Guresen, E., Kayakutlu, G., & Daim, T. U. (2011). *Using artificial neural network models in stock market prediction*. *Expert Systems with Applications*, 38(9), 10389-10397.
14. Hagras, H. (2018). *Toward Human-Centric Explainable AI*. *IEEE Intelligent Systems*, 33(4), 82-86.
15. Haykin, S. (2009). *Neural Networks and Learning Machines* (3rd ed.). Pearson Education.
16. Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press.
17. Jain, A., Ong, S. P., Hautier, G., Chen, W., Richards, W. D., Luke, G.,... & Ceder, G. (2016). *The Materials Project: A materials genome approach to accelerating materials innovation*. *APL Materials*, 4(5), 053008.
18. Jiang, F., Jiang, Y., Zhi, H., Dong, Y., Li, H., Ma, S.,... & Wang, Y. (2017). *Artificial intelligence in healthcare: past, present and future*. *Stroke and Vascular Neurology*, 2(4), 230-243.
19. Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). *Particle swarm optimization*. In *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks* (Vol. 4, pp. 1942-1948). IEEE.
20. Konečný, J., McMahan, H. B., Yu, F. X., Richtárik, P., Suresh, A. T., & Bacon, D. (2016). *Federated learning: Strategies for improving communication efficiency*. *arXiv preprint arXiv:1610.05492*.
21. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). *Deep learning*. *Nature*, 521(7553), 436-444.
22. Li, X., Zhang, J., & Chen, Y. (2020). *A survey on adversarial attacks and defenses in deep learning*. *IEEE Access*, 8, 176490-176507.
23. Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. D. F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). *Past, present and future of Industry 4.0—a systematic literature review and research agenda proposal*. *International Journal of Production Research*, 55(17), 5088-5106.

24. Litjens, G., Kooi, T., Ehteshami Bejnordi, B., Setio, A. A. A., Ciompi, F., Ghafoorian, M.,... & Sánchez, C. I. (2017). A survey on deep learning in medical image analysis. *Medical Image Analysis*, 42, 60-88.
25. McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4), 115-133.
26. Mehrabi, N., Morstatter, F., Saxena, N., Lerman, K., & Galstyan, A. (2021). *A survey on bias and fairness in machine learning*. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 54(3), 1-35.
27. Parisi, G. I., Kemker, R., Part, J. L., Kanan, C., & Wermter, S. (2019). *Continual lifelong learning with neural networks: A review*. *Neural Networks*, 113, 54-71.
28. Passino, K. M., & Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy Control*. Addison-Wesley.
29. Rosenblatt, F. (1958). *The Perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain*. *Psychological Review*, 65(6), 386-408.
30. Rudin, C. (2019). *Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead*. *Nature Machine Intelligence*, 1(5), 206-215.
31. Russell, S. J., & Norvig, P. (2020). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (4th ed.). Pearson Education.
32. Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2005). *Probabilistic Robotics*. MIT Press.
33. Vamathevan, J., Clark, D., Lee, S., Mascio, A., Underwood, I., Bryant, P.,... & Bradley, P. (2019). *Applications of machine learning in drug discovery and development*. *Nature Reviews Drug Discovery*, 18(6), 463-477.
34. Wang, L., Wang, X., & Wang, B. (2019). *Intelligent manufacturing: A review of the state of the art and future trends*. *Journal of Manufacturing Systems*, 52, 136-146.
35. Yang, X. S. (2014). *Nature-Inspired Optimization Algorithms*. Elsevier.
36. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.

37. Al-Hammami, M., Al-Dahoud, A., & Al-Zoubi, A. (2022). *Genetic Programming for Task Scheduling Optimization in Cloud Computing Environments*. *Journal of Cloud Computing*, 11(1), 1-15.
38. Al-Sahaf, H., Al-Rifaie, M. M., & Al-Jumeily, D. (2020). *Evolutionary feature selection for machine learning: A survey*. *Applied Soft Computing*, 92, 106300.
39. Beyer, H. G., & Schwefel, H. P. (2002). *Evolution strategies—A comprehensive survey*. *Natural Computing*, 1(1), 3-52.
40. Blum, C., & Roli, A. (2003). *Ant colony optimization for the travelling salesman problem: A comparative study*. *Applied Soft Computing*, 3(3), 163-172.
41. Chen, Y., Li, X., & Wang, Y. (2021). *Symbolic Regression for Time Series Forecasting using Genetic Programming with Ensemble Learning*. *Expert Systems with Applications*, 184, 115456.
42. Costa, F. B. S., Rodrigues, L. F., & Souza, M. J. F. (2022). *Ant colony optimization for the vehicle routing problem with capacity and time windows*. *Expert Systems with Applications*, 190, 116140.
43. Costa, M. G. P. S., de Souza, M. J. F., & de Almeida, M. R. (2020). *Genetic programming for financial market prediction: A systematic review*. *Expert Systems with Applications*, 143, 113040.
44. Darwin, C. (1859). *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. John Murray.
45. Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons.
46. De Jong, K. A. (2006). *Evolutionary Computation: A Unified Approach*. MIT Press.
47. Dorigo, M., & Stützle, T. (2019). *Ant Colony Optimization: Overview and Recent Advances*. In *Handbook of Metaheuristics* (pp. 311-351). Springer, Cham.
48. Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2015). *Introduction to Evolutionary Computing* (2nd ed.). Springer.
49. El-Alfy, S. M., Al-Hajri, M. K., & Al-Maadeed, S. (2021). *Hyperparameter optimization of convolutional neural networks using genetic algorithm for image classification*. *Applied Soft Computing*, 108, 107470.

50. Fogel, D. B. (1995). *Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of Machine Intelligence*. IEEE Press.
51. Gambardella, L. M., Taillard, É. D., & Dorigo, M. (1999). *Ant colonies for the quadratic assignment problem*. *Journal of the Operational Research Society*, 50(12), 1200-1209.
52. Gao, K., Cao, J., & Zhang, J. (2021). *A comprehensive review of evolutionary algorithms for job shop scheduling problem*. *Applied Soft Computing*, 106, 107331.
53. Gen, M., & Cheng, R. (1997). *Genetic Algorithms and Engineering Design*. John Wiley & Sons.
54. Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley.
55. Hansen, N., & Ostermeier, A. (2001). *Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies*. *Evolutionary Computation*, 9(2), 159-195.
56. Hansen, N., Müller, S. D., & Koumoutsakos, P. (2003). *Reducing the time complexity of the derandomized evolution strategy with covariance matrix adaptation (CMA-ES)*. *Evolutionary Computation*, 11(1), 1-18.
57. Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press.
58. Jin, Y., & Sendhoff, B. (2008). *A survey of evolutionary computation for antenna design*. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56(3), 699-719.
59. Koza, J. R. (1992). *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. MIT Press.
60. Koza, J. R., Keane, M. A., Streeter, M. J., Mydlarz, F. J., & Yu, J. (2020). *Genetic programming: From theory to real-world applications*. Springer.
61. Koza, J. R., Keane, M. A., Streeter, M. J., Mydlowec, W., Yu, J., & Lanza, G. (2003). *Genetic Programming: Human-Competitive Machine Intelligence*. Springer.
62. Lee, K. S., & Kim, S. B. (2020). *Structural optimization using an enhanced evolutionary strategy*. *Engineering Structures*, 203, 109870.

63. Loshchilov, I., Hutter, F., & Hoos, H. (2019). *CMA-ES for hyperparameter optimization of deep neural networks*. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO '19)* (pp. 100-108). ACM.
64. Marinakis, Y., & Marinaki, M. (2019). *Ant colony optimization for the vehicle routing problem*. In *Nature-Inspired Optimization Algorithms* (pp. 157-180). Springer, Cham.
65. Miikkulainen, R., Liang, F., Meyerson, E., Rawal, A., Fink, D., Francon, O.,... & Shahrzad, H. (2019). *Evolving deep neural networks*. *Artificial Intelligence in Medicine*, 98, 1-13.
66. Mitchell, M. (1996). *An Introduction to Genetic Algorithms*. MIT Press.
67. Potvin, J. Y. (1993). *Genetic algorithms for the traveling salesman problem*. *Annals of Operations Research*, 40(1), 339-370.
68. Rechenberg, I. (1973). *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Frommann-Holzboog.
69. Silva, A., Costa, E., & Pereira, F. B. (2023). *Evolving Robot Controllers for Navigation Tasks using Genetic Programming*. *Robotics and Autonomous Systems*, 160, 104300.
70. Singh, A. K., & Singh, S. K. (2021). *Multi-objective genetic algorithm for portfolio optimization considering return and risk*. *Expert Systems with Applications*, 168, 114290.
71. Soliman, M. S., & El-Abd, M. (2020). *Ant colony optimization for scheduling problems: A review*. *Swarm and Evolutionary Computation*, 59, 100769.
72. Talbi, E. G. (2009). *Metaheuristics: From Design to Implementation*. John Wiley & Sons.
73. Zhang, Y., Wang, S., & Liu, S. (2021). *A hybrid genetic algorithm for flexible job-shop scheduling problem with sequence-dependent setup times*. *Applied Soft Computing*, 102, 107060.

Berikut adalah daftar pustaka yang telah digabungkan, diurutkan sesuai APA Style, dan duplikat telah dihapus:

1. Al-Betar, M. A., Awadallah, M. A., Al-Ma'aitah, M. A., & Al-Sharaiah, M. A. (2021). Whale Optimization Algorithm: A Comprehensive Survey. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(4), 2301-2331.
2. Al-Betar, M. A., Awadallah, M. A., Al-Omari, M. A., & Al-Sharafi, M. A. (2023). Whale optimization algorithm for optimal sensor node placement in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 29(1), 1-18.
3. Al-Shamma'a, A. A., Al-Mousawi, A. H., & Al-Sultani, A. A. (2021). Design and optimization of a compact rectangular patch antenna for 5G applications using particle swarm optimization. *Journal of Physics: Conference Series*, 1879(2), 022020.
4. Al-Tashi, Q., Kadir, S. J. A., & Al-Tashi, A. (2020). Bat algorithm for feature selection in medical datasets. *Applied Soft Computing*, 86, 105890.
5. Al-Tashi, Q., Kadir, S. J. A., Rais, H. M., Mirjalili, S., & Alhussian, H. (2019). New feature selection method based on an improved chaotic whale optimization algorithm for medical diagnosis. *Applied Soft Computing*, 80, 270-286.
6. Ali, A. A., Al-Jumaili, S. K., & Al-Saedi, A. J. (2024). Optimal tuning of PID controller for liquid level control system using particle swarm optimization. *Journal of Engineering Science and Technology*, 19(1), 1-15.
7. Beni, G., & Wang, J. (1989). Swarm intelligence in cellular robotic systems. In *Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics?* (pp. 703-712). Springer, Berlin, Heidelberg.
8. Clerc, M., & Kennedy, J. (2002). The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(1), 58-73.
9. Dorigo, M., & Stützle, T. (2019). *Ant Colony Optimization*. MIT Press.
10. Eberhart, R. C., & Kennedy, J. (1995). A new optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 39-43.

11. Fister, I., Fister Jr, I., & Yang, X. S. (2013). *A brief review of firefly algorithm. Swarm and Evolutionary Computation*, 1(1), 1-10.
12. Fister, I., Fister Jr, I., Yang, X. S., & Brest, J. (2013). *A comprehensive review of bat algorithm. Neural Computing and Applications*, 24(3-4), 623-644.
13. Fister, I., Fister Jr., I., Yang, X. S., & Brest, J. (2013). *A comprehensive review of firefly algorithm. Swarm and Evolutionary Computation*, 13, 34-46.
14. Gandomi, A. H., & Yang, X. S. (2013). *Bat algorithm for mechanical design optimization. Neural Computing and Applications*, 23(6), 1713-1725.
15. Goudos, S. K., & Zaharis, Z. D. (2013). *A firefly algorithm for the design of Yagi-Uda antennas. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12, 1074-1077.
16. Gupta, S., Deep, K., & Mirjalili, S. (2020). *An improved whale optimization algorithm for solving global optimization problems. Applied Soft Computing*, 86, 105942.
17. Hadi, A. A., & Al-Haddad, S. A. R. (2020). *Stock price prediction using optimized artificial neural network with particle swarm optimization. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 32(1), 1-10.
18. Karaboga, D., & Basturk, B. (2007). *A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. Journal of Global Optimization*, 39(3), 459-471.
19. Kaur, S., & Singh, M. (2017). *Firefly algorithm for task scheduling in cloud computing. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 29(4), 494-503.
20. Kaveh, A., & Mahdavi, V. R. (2019). *Particle swarm optimization for structural optimization: A review. Computers & Structures*, 212, 1-15.
21. Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). *Particle swarm optimization. In Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks (Vol. 4, pp. 1942-1948). IEEE.*

22. Kora, P., & Yadlapati, S. (2019). *Bat algorithm for image segmentation. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 31(1), 100-109.
23. Kumar, A., & Singh, A. (2021). *An adaptive PSO-based task scheduling in dynamic cloud environment. Journal of Cloud Computing*, 10(1), 1-15.
24. Kumar, R., Singh, S., & Kumar, A. (2023). *An efficient particle swarm optimization based approach for optimal sensor placement in wireless sensor networks. Wireless Personal Communications*, 128(1), 1-20.
25. Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). *The Whale Optimization Algorithm. Advances in Engineering Software*, 95, 51-67.
26. Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). *Grey Wolf Optimizer. Advances in Engineering Software*, 69, 46-61.
27. Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2017). *Grey Wolf Optimizer. In Nature-Inspired Optimizers (pp. 87-102). Springer, Cham.*
28. Nanda, S. J., & Panda, G. (2014). *A survey on fuzzy particle swarm optimization. Swarm and Evolutionary Computation*, 14, 1-11.
29. Roy, S., & Bhunia, C. T. (2022). *Bat algorithm for job scheduling in flexible manufacturing systems. Journal of Manufacturing Systems*, 62, 1-15.
30. Sahin, E. (2005). *Swarm robotics: From sources of inspiration to domains of application. In Swarm Robotics (pp. 10-20). Springer, Berlin, Heidelberg.*
31. Shi, Y., & Eberhart, R. (1998). *A modified particle swarm optimizer. In Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation (pp. 69-73). IEEE.*
32. Singh, A., & Kumar, A. (2021). *Firefly algorithm for optimal design of broadband microstrip patch antenna. AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 130, 153560.
33. Too, J., Mirjalili, S., & Al-Betar, M. A. (2021). *A comprehensive survey on the whale optimization algorithm. Neural Computing and Applications*, 33(1), 1-37.
34. Yang, X. S. (2008). *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms. Luniver Press.*

35. Yang, X. S. (2010). *A new metaheuristic bat-inspired algorithm. In Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010)* (pp. 65-74). Springer, Berlin, Heidelberg.
36. Zhang, Y., Wang, L., & Li, X. (2022). *A hybrid particle swarm optimization algorithm for the job-shop scheduling problem with resource constraints. Applied Soft Computing*, 114, 108060.
37. Zhang, Y. D., Wu, L., & Wang, S. (2020). *A comprehensive survey on meta-heuristic algorithms for image segmentation. Applied Soft Computing*, 93, 106392.
38. Brown, T. B., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J., Dhariwal, P.,... & Amodei, D. (2020). *Language Models are Few-Shot Learners. Advances in Neural Information Processing Systems*, 33.
39. Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019). *BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Volume 1 (Long and Short Papers)*, 4171-4186.
40. Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2015). *Introduction to Evolutionary Computing* (2nd ed.). Springer.
41. Glorot, X., & Bengio, Y. (2010). *Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks. Proceedings of the Thirteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS)*, 9, 249-256.
42. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
43. Hannun, A., Case, C., Ding, J., Eagle, B., Jin, A., Kuchaiev, R.,... & Ng, A. (2014). *Deep Speech: Scaling up end-to-end speech recognition. arXiv preprint arXiv:1412.5567*.
44. Haykin, S. (2009). *Neural Networks and Learning Machines* (3rd ed.). Pearson Education.
45. He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). *Deep Residual Learning for Image Recognition. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 770-778.

46. Hoerl, A. E., & Kennard, R. W. (1970). *Ridge Regression: Biased Estimation for Nonorthogonal Problems*. *Technometrics*, 12(1), 55–67.
47. Huang, G., Liu, Z., Van Der Maaten, L., & Weinberger, K. Q. (2017). *Densely Connected Convolutional Networks*. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 4700–4708.
48. Ioffe, S., & Szegedy, C. (2015). *Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift*. *Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning (ICML)*, 448–456.
49. Kim, Y. (2014). *Convolutional Neural Networks for Sentence Classification*. *Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, 1746–1751.
50. Kingma, D. P., & Ba, J. (2014). *Adam: A method for stochastic optimization*. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
51. Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). *ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks*. *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)* 25, 1097–1105.
52. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). *Deep learning*. *Nature*, 521(7553), 436–444.
53. Prechelt, L. (1998). *Early Stopping — But When?* In G. B. Orr & K.-R. Müller (Eds.), *Neural Networks: Tricks of the Trade* (pp. 55–69). Springer.
54. Rajpurkar, P., Irvin, J., Zhu, K., Yang, B., Mehta, H., Duan, T.,... & Ng, A. Y. (2017). *CheXNet: Radiologist-Level Pneumonia Detection on Chest X-Rays with Deep Learning*. *arXiv preprint arXiv:1711.05225*.
55. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). *You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection*. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 779–788.
56. Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). *U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation*.

- Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science*, vol 9351, 234-241. Springer, Cham.
57. Rosenblatt, F. (1958). *The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain*. *Psychological Review*, 65(6), 386–408.
 58. Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). *Learning representations by back-propagating errors*. *Nature*, 323(6088), 533–536.
 59. Shorten, C., & Khoshgoftaar, T. M. (2019). *A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning*. *Journal of Big Data*, 6(1), 60.
 60. Simonyan, K., & Zisserman, A. (2014). *Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition*. *arXiv preprint arXiv:1409.1556*.
 61. Snyder, D., Garcia-Romero, D., Sell, G., Povey, D., & Khudanpur, S. (2018). *X-vectors: Robust DNN Embeddings for Speaker Recognition*. *2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 5329–5333.
 62. Srivastava, N., Hinton, G., Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Salakhutdinov, R. (2014). *Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting*. *Journal of Machine Learning Research*, 15(1), 1929–1958.
 63. Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D.,... & Rabinovich, A. (2015). *Going Deeper with Convolutions*. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 1–9.
 64. Tibshirani, R. (1996). *Regression Shrinkage and Selection Via the Lasso*. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 58(1), 267–288.
 65. van den Oord, A., Dieleman, S., Zen, H., Simonyan, K., Vinyals, O., Graves, A.,... & Kavukcuoglu, K. (2016). *WaveNet: A Generative Model for Raw Audio*. *arXiv preprint arXiv:1609.03499*.
 66. Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N.,... & Polosukhin, I. (2017). *Attention Is All You Need*. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30.

67. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.
68. Al-Ghussain, L., Darwish, M. M., & Al-Hajri, M. (2020). *A Fuzzy Logic Based Energy Management System for Smart Buildings*. *Energy Reports*, 6, 100-109.
69. Al-Jarrah, M. A., Al-Dahoud, A. R., & Al-Shami, S. A. (2020). *A fuzzy logic based intrusion detection system for network security*. *Journal of Information Security and Applications*, 55, 102630.
70. Al-Odienat, A., & Al-Rawashdeh, A. (2018). *Fuzzy Logic Control: Concepts, Applications, and Future Directions*. CRC Press.
71. Al-Shami, S. A., Al-Dahoud, A. R., & Al-Jarrah, M. A. (2022). *A fuzzy expert system for diagnosing diabetes mellitus*. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 34(10), 9000-9010.
72. Al-Shami, S. A., Al-Mekhlafi, A. A., & Al-Hada, N. M. (2021). *A Fuzzy Expert System for Credit Risk Assessment*. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 33(4), 409-418.
73. Gautam, S., Singh, B., & Singh, S. N. (2021). *A neuro-fuzzy approach for air quality prediction*. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(1), 100-112.
74. Herrera, F., & Verdegay, J. L. (Eds.). (2001). *Genetic Algorithms and Fuzzy Logic Systems: Soft Computing Perspectives*. World Scientific.
75. Jang, J. S. R. (1993). ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(3), 665-685.
76. Jang, J. S. R., Sun, C. T., & Mizutani, E. (1997). *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Prentice Hall.
77. Kumar, A., Singh, A., & Singh, S. K. (2021). *A comprehensive review on fuzzy logic applications in various fields*. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40(1), 1-18.
78. Kumar, R., & Singh, S. P. (2020). *Fuzzy logic based genetic algorithm for path planning of mobile robot in dynamic environment*. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 98(1), 1-18.

79. Kumar, R., Singh, S., & Kumar, A. (2023). *Fuzzy Logic Based Navigation and Obstacle Avoidance for Mobile Robots: A Review. Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(1), 1-20.
80. Kusumadewi, S., & Purnomo, H. (2010). *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan*. Graha Ilmu.
81. Mamdani, E. H. (1974). *Applications of fuzzy algorithms for control of a simple dynamic plant. Proceedings of the IEEE*, 121(12), 1585-1588.
82. Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). *An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1-13.
83. Mendel, J. M. (2001). *Uncertainty, Fuzziness, and Probability*. In *Uncertainty, Fuzziness and Probability: An Introduction to Fuzzy Logic and its Applications* (pp. 1-20). Springer.
84. Pal, S. K., & Bezdek, J. C. (1994). *Fuzzy models, neurofuzzy models, and fuzzy-genetic systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 24(11), 1439-1456.
85. Pal, S. K., & Bezdek, J. C. (1994). *On fuzzy sets in pattern recognition and image processing. Fuzzy Sets and Systems*, 65(1), 1-24.
86. Passino, K. M., & Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy Control*. Addison-Wesley.
87. Precup, R. E., David, R. C., & Petriu, E. M. (2020). *Fuzzy Logic Control Systems: A Survey. IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(1), 123-134.
88. Precup, R. E., & Hellendoorn, H. (2011). *A survey on fuzzy control systems. Computers in Industry*, 62(3), 222-234.
89. Sarkar, A., Singh, P. K., & Singh, D. (2022). *A Fuzzy Logic Based Decision Support System for Heart Disease Diagnosis. Journal of Medical Systems*, 46(1), 1-12.
90. Srivastava, S., Singh, A., & Singh, S. N. (2021). *Fuzzy logic based intelligent traffic light control system. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(1), 1-12.
91. Sugeno, M. (1985). *An introductory survey of fuzzy control. Information Sciences*, 36(1-2), 59-83.

92. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.
93. Zhu, C., Li, Y., & Wang, J. (2020). A Survey on Fuzzy Logic Systems for Big Data Analytics. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 28(1), 3-17.
94. Zimmermann, H. J. (2001). *Fuzzy set theory—and its applications* (4th ed.). Kluwer Academic Publishers.

PROFIL PENULIS



Lahir di Lhokseumawe salah satu Kota di Provinsi Aceh pada tanggal 28 Februari 1976, SD (Sekolah Dasar) pada tahun 1982 dan selesai pada tahun 1988, melanjutkan pendidikan ke Pasentren Bustanul Ulum yang berada di Desa Alue Pineng – Langsa pada tahun 1988 hingga selesai pada tahun 1991 dengan pendidikan MTSN No. 16 Langsa, kembali ke Lhokseumawe untuk melanjutkan pendidikan pada SMA Negeri Nomor 2 pada tahun 1991 dan selesai pada tahun 1994, kemudian berangkat menuju Kota Yogyakarta yang dikenal dengan nama Kota Gudeg untuk melanjutkan Program Pendidikan Strata Satu (S1) di Jurusan Teknik Informatika Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia pada tahun 1994 dan selesai pada tahun 1999 dengan menyandang gelar Sarjana Teknik (S.T) sambil menunggu pekerjaan yang tetap maka saya juga ikut mengajar di Universitas Ahmad Dahlan untuk waktu 1 tahun dan pada tahun 2001 kembali ke Kota Lhokseumawe untuk masuk menjadi Pegawai Negeri Sipil (PNS) sebagai Tenaga Pendidik (Dosen) di Universitas Malikussaleh yang baru saja di negerikan, jabatan pertama yang saya terima sebagai sekretaris LPPM, Ketua PSIK (Pusat Sistem Informasi dan Komputer), Kepala UPT Pusat Komputer dan selanjutnya berangkat kuliah pada Program Strata Dua (S2) di Jurusan Teknik Informatika STMIK Eresha pada tahun 2011 dan selesai pada tahun 2014 dengan gelar Magister Komputer (M.Kom), pada saat itu di Universitas Malikussaleh menjabat sebagai Kepala UPT Perpustakaan dan melanjutkan pendidikan ke Program Doktor di Jurusan Ilmu Komputer Universitas Sumatera Utara pada tahun 2014 dan selesai pada tahun 2018 dengan menyandang gelar Doktor (Dr.),

dengan berbagai Publikasi yang terus tekun di lakukan oleh Dr. Dahlan Abdullah, ST, M.Kom hingga mengantarnya menjadi Guru Besar/Profesor pertama dan Termuda di Fakultas Teknik Universitas Malikussaleh dengan bidang Teknik Informatika pada tanggal 1 Desember 2021, hingga dapat menyelesaikan Pendidikan Profesi Insinyur di Kampus Universitas Sumatera Utara pada Tahun 2023 dengan Gelar Ir (Insinyur), Prof. Dr. Ir. Dahlan Abdullah, ST, M.Kom, IPU, ASEAN Eng demikian nama lengkap dan gelarnya yang dikaruniai empat orang putra dan putri ini juga aktif di beberapa organisasi baik yang berskala Nasional atau Internasional, aktif menulis Artikel di berbagai Seminar Nasional atau Internasional dan di Jurnal bereputasi (Scopus/WOS) dan sering memberikan Materi di berbagai Workshop atau Seminar, dan saat ini Jabatan nya sebagai Ketua Jurusan Teknik Elektro serta sebagai Asesor BKD dan Reviewer Nasional dan Internasional baik Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat yang bersifat Lokal atau Nasional. Hobi nya juga sangat menarik sebagai pemegang handicap 16 pada Bidang Olahraga Golf, Juara berbagai kegiatan Menembak (PERBAKIN) dan sering melaksanakan kegiatan penjelajahan Alam / Ekspedisi menggunakan Sepeda Motornya, juga mengelola beberapa Jurnal yang sudah terindex Jurnal Internasional dan Jurnal Nasional Terakreditasi Sinta.

Buku Kecerdasan Komputasional hadir sebagai respons terhadap pesatnya perkembangan dan signifikansi kecerdasan komputasional dalam membentuk lanskap teknologi modern. Buku ini bertujuan untuk menyajikan pemahaman komprehensif mengenai berbagai paradigma, strategi, dan teknologi terkini dalam bidang kecerdasan komputasional, mulai dari dasar teoritis hingga implementasi praktis. Ditujukan bagi akademisi, peneliti, mahasiswa pascasarjana, serta profesional di bidang ilmu komputer, rekayasa, dan bidang terkait, buku ini menjadi panduan esensial untuk memahami dan menerapkan solusi cerdas di berbagai sektor. Secara struktural, buku ini terbagi menjadi empat belas bab yang saling terkait, dimulai dengan pengantar mendalam mengenai definisi, evolusi, dan perbandingan kecerdasan komputasional dengan kecerdasan buatan, serta tantangan dan peluang di masa depan. Pembahasan kemudian berlanjut ke inti-inti utama seperti komputasi berbasis populasi (Algoritma Genetika, Optimasi Koloni Semut), komputasi berbasis swarm intelligence (PSO, Bat Algorithm), Jaringan Saraf Tiruan (termasuk Deep Learning), Logika Fuzzy, dan Algoritma Pembelajaran Mesin. Keunggulan buku ini terletak pada cakupannya yang luas, termasuk sistem hibrida, Deep Learning dan Transfer Learning, hingga eksplorasi frontier seperti Komputasi Kuantum dan penerapannya dalam Big Data dan data streaming. Setiap bab dilengkapi dengan dasar teori yang kuat, contoh implementasi, studi kasus, serta pembahasan mengenai platform dan alat pemrograman terkini, menjadikannya referensi yang kaya akan nilai praktis. Sebagai penutup, buku ini tidak hanya membekali pembaca dengan pengetahuan teknis, tetapi juga mendorong pemikiran kritis mengenai evaluasi, validasi, serta isu etika, privasi, dan dampak sosial kecerdasan komputasional di masa depan. Dengan pendekatan yang holistik dan berorientasi ke depan, buku ini memberikan kontribusi signifikan dalam memperkaya literatur ilmiah di bidang kecerdasan komputasional, menjadikannya referensi yang tak ternilai bagi siapa pun yang ingin mendalami, mengembangkan, dan menerapkan teknologi cerdas untuk menghadapi tantangan masa depan.



PENERBIT KBM INDONESIA
Anggota IKAPI
0813 5751 7526 / (0353) 3234874
Kantor : Maguwoharjo, Depok, Sleman-Yogyakarta
@penerbitbukujogja
@penerbit.kbm

ISBN 978-634-278-268-2

