



**FORUM GURU BESAR**  
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



# **Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung**



## **PERAN PEMBELAJARAN MESIN PADA INDUSTRI TELEKOMUNIKASI BERKELANJUTAN**

**Profesor Hendrawan**

**Sekolah Teknik Elektro dan Informatika  
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB  
18 Mei 2024**



Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

**PERAN PEMBELAJARAN MESIN PADA  
INDUSTRI TELEKOMUNIKASI  
BERKELANJUTAN**



Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

# **PERAN PEMBELAJARAN MESIN PADA INDUSTRI TELEKOMUNIKASI BERKELANJUTAN**

**Prof. Hendrawan**

18 Mei 2024  
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

*Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:*

**PERAN PEMBELAJARAN MESIN PADA INDUSTRI TELEKOMUNIKASI  
BERKELANJUTAN**

Penulis : Prof. Hendrawan

Reviewer : Prof. Nana Rachmana Syambas

Editor : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-446-3

e-ISBN : 978-623-297-447-0 (PDF)



© Gedung STP ITB, Lantai 1,  
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132  
☎ +62 22 20469057  
🌐 www.itbpress.id  
✉ office@itbpress.id  
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92  
APPTI No. 005.062.1.10.2018

# PRAKATA

*Bismillahirrahmanirrahim.*

*Alhamdulillah* saya panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu Wata'ala Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, penulis dapat menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini.

Penghargaan dan rasa hormat serta terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung, atas perkenannya pada penulis untuk menyampaikan orasi ilmiah ini pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar.

Buku untuk orasi ilmiah yang penulis susun ini berjudul "**Peran Pembelajaran Mesin Pada Industri Telekomunikasi Berkelanjutan**". Buku ini merupakan upaya untuk menjelajahi peran yang semakin penting dari pembelajaran mesin dalam mengarahkan perkembangan industri telekomunikasi menuju keberlanjutan yang lebih baik.

Industri telekomunikasi telah menjadi tulang punggung dalam menyatukan dunia secara global, menghubungkan individu dan komunitas di seluruh penjuru bumi. Namun, di tengah kemajuan teknologi yang begitu pesat, industri ini juga dihadapkan pada berbagai tantangan yang kompleks, mulai dari meningkatnya permintaan akan koneksi yang cepat hingga kebutuhan akan keamanan yang lebih kuat serta tuntutan untuk melakukan praktik berkelanjutan untuk mengurangi permasalahan lingkungan dan dampak permasalahan sosial.

Dalam konteks ini, pembelajaran mesin muncul sebagai kekuatan pendorong yang sangat berpotensi untuk mengatasi tantangan tersebut dan membantu industri telekomunikasi bergerak menuju masa depan yang berkelanjutan. Dengan kemampuannya dalam menganalisis data, memprediksi perilaku pengguna, mengoptimalkan jaringan, dan meningkatkan keamanan, pembelajaran mesin memberikan kontribusi signifikan dalam memajukan industri ini ke tingkat yang lebih tinggi.

Pada kesempatan ini, penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. Ir. Nana Rachmana Syambas, M.Eng. yang telah bersedia

melakukan tinjauan, memberikan masukan, dan saran yang sangat berarti terhadap karya ini. Tak lupa, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam proses penulisan buku ini.

Semoga tulisan ini dapat memberikan wawasan, dan inspirasi yang bermanfaat bagi para pembaca

Bandung, 18 Mei 2024

Penulis

# SINOPSIS

Orasi ilmiah ini mengangkat tema “**Peran Pembelajaran Mesin Pada Industri Telekomunikasi Berkelanjutan**”. Pembelajaran mesin (*Machine Learning*) dapat memainkan peran penting dalam perkembangan telekomunikasi, terutama dengan kemajuan teknologi *5G and beyond*. Dengan meningkatnya kompleksitas jaringan telekomunikasi, pembelajaran mesin akan memainkan peran yang lebih penting dalam mengatasi kompleksitas jaringan generasi mendatang yang berkelanjutan. Algoritma pembelajaran mesin menjadi penting untuk mengoptimalkan kinerja jaringan, memastikan alokasi sumber daya yang efisien, memprediksi perilaku pengguna serta meningkatkan pengalaman pengguna secara keseluruhan, serta meningkatkan keamanan.

Menerapkan praktik berkelanjutan dalam pengembangan telekomunikasi dapat mengurangi permasalahan lingkungan, dampak permasalahan sosial dan aspek tata kelola dalam domain industri telekomunikasi. Dampak lingkungan dapat diminimalisir misalkan dengan penerapan teknologi hemat energi dan mendorong inisiatif daur ulang komponen elektronik.

Dari perspektif sosial, pembangunan telekomunikasi berkelanjutan mencakup jaminan akses yang adil terhadap layanan komunikasi, khususnya di daerah tertinggal dan pedesaan. Menjembatani kesenjangan digital dan mendorong inklusi digital dapat berkontribusi terhadap pembangunan sosial dan pemberdayaan ekonomi. Selain itu, perusahaan telekomunikasi mempunyai tanggung jawab untuk menghormati hak asasi manusia, privasi, dan perlindungan data, dengan menekankan pentingnya mengintegrasikan pertimbangan etika.

Demikian juga, aspek tata kelola sangat pentingnya dalam pembangunan telekomunikasi berkelanjutan, yang mencakup kerangka peraturan, transparansi, dan akuntabilitas. Tata kelola yang efektif dapat mendorong persaingan yang adil, perlindungan konsumen, dan langkah-langkah keamanan siber, serta mendorong ekosistem telekomunikasi yang dapat dipercaya dan tangguh. Selain itu, mematuhi praktik bisnis yang etis dan prinsip tanggung jawab sosial dari pemain industri telekomunikasi dapat meningkatkan tata kelola industri secara keseluruhan.

Dengan mengadopsi trend kemajuan teknologi pembelajaran mesin serta menggabungkan teknologi ramah lingkungan, mendorong inklusi digital, dan menjunjung tinggi prinsip tata kelola yang kuat, pembangunan telekomunikasi dapat maju secara berkelanjutan, memberikan kontribusi terhadap kesejahteraan bumi, masyarakat, dan perekonomian.

# DAFTAR ISI

PRAKATA.....	v
SINOPSIS .....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
1 Pendahuluan .....	1
1.1 Evolusi Telekomunikasi Nirkabel ( <i>Mobile Broadband</i> ).....	3
1.2 <i>Landscape</i> Telekomunikasi Indonesia .....	11
1.3 Menjembatani Kesenjangan Digital ( <i>Digital Divide</i> ) .....	11
1.4 <i>Broadband</i> dan Pertumbuhan Ekonomi.....	15
1.5 Transformasi Digital/Ekosistem Digital .....	18
1.6 Posisi Indonesia dalam Lanskap Global .....	22
2 TANTANGAN TELEKOMUNIKASI BERKELANJUTAN .....	25
2.1 Tuntutan Industri Keberlanjutan.....	25
2.2 Jejak Karbon ( <i>Carbon Foot Print</i> ) Industri Telekomunikasi ...	27
2.3 Strategi Industri Berkelanjutan .....	31
3 PERAN PEMBELAJARAN MESIN DALAM MENDUKUNG TELEKOMUNIKASI BERKELANJUTAN .....	33
3.1 Pembelajaran Mesin .....	33
3.2 Pembelajaran Mesin dalam Telekomunikasi.....	37
3.3 Integrasi AI/ML ke dalam Sistem Telekomunikasi.....	40
3.4 Penelitian Terkait yang Dilakukan.....	45
3.5 Prediksi Trafik dan <i>Throughput</i> Berdasarkan Data KPI.....	49
4 PENUTUP.....	63
5 Ucapan Terima Kasih.....	67
DAFTAR PUSTAKA .....	69
CURRICULUM VITAE .....	75



# DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.</b>	Sejarah Perkembangan 3G di Indonesia (LPPM ITB, 2018). .....	5
<b>Gambar 2.</b>	Sejarah Perkembangan 4G di Indonesia (LPPM ITB, 2018). .....	6
<b>Gambar 3.</b>	Prediksi Perkembangan 5G di Indonesia (LPPM ITB, 2018). .....	8
<b>Gambar 4.</b>	<i>Use-cases</i> Aplikasi 5G. (ITU 2015).....	9
<b>Gambar 5.</b>	Evolusi Teknologi Nirkabel (adaptasi dari berbagai sumber).....	10
<b>Gambar 6.</b>	Pengguna TIK di Indonesia Tahun 2018 – 2022 (BPS, 2023). .....	11
<b>Gambar 7.</b>	Persentase Penduduk yang Memiliki/Menguasai Telepon Seluler menurut Provinsi Tahun 2022 (BPS, 2023). .....	12
<b>Gambar 8.</b>	Proyek Satelit Satria-1 (BAKTI 2020). .....	13
<b>Gambar 9.</b>	Proyek Palapa Ring (Bakti).....	14
<b>Gambar 10.</b>	Program Akses Internet (AI) dan Program Backhaul BAKTI. ....	15
<b>Gambar 11.</b>	Dampak Peningkatan 10% Penetrasi Broadband Terhadap Pertumbuhan PDB (ITU, 2021). .....	16
<b>Gambar 12.</b>	Strategi untuk pemanfaatan pita-pita eksisting <i>mobile broadband</i> di Indonesia (LPPM ITB, 2018). .....	17
<b>Gambar 13.</b>	Kerangka Visi Indonesia Digital 2045 (Kominfo, 2023). .....	19
<b>Gambar 14.</b>	Potensi ekonomi digital Indonesia (Katadata.co.id). .....	21
<b>Gambar 15.</b>	Posisi MCI Indonesia di ASEAN dan diantara Negara Leaders (Adopsi dari GSMA, 2023a). .....	24
<b>Gambar 16.</b>	Peta DTI 2022 (Seunghwa dkk., 2022).....	24
<b>Gambar 17.</b>	<i>Global telecoms footprint (devices dan infrastructure)</i> (Wessam dkk., 2021).....	28
<b>Gambar 18.</b>	Total Konsumsi Energi dari Elemen Jaringan ( <i>Network Elements</i> ) vs <i>End Devices</i> Dunia 2019 ke 2030 (Lian, 2020). .....	29
<b>Gambar 19.</b>	Total Konsumsi Energi Global Jaringan 4G dan 5G Dunia: 2019 ke 2030 (ABI Research). .....	29

<b>Gambar 20.</b>	Rasio Konsumsi Energi dari RAN, Core Networks dan Edge Server dalam Persen Dunia: 2019 ke 2030 (Lian, 2020). .....	29
<b>Gambar 21.</b>	Penggelaran 5G dengan Konsumsi Energi yang menurun (Ericsson, 2020).....	30
<b>Gambar 22.</b>	Relasi antara <i>Artificial Intelligence, Machine Learning, Deep Learning,</i> dan <i>Reinforcement Learning</i> . .....	33
<b>Gambar 23.</b>	Perbedaan Programming Tradisional dan ML: (a) Programming Tradisional, (b) <i>Supervise Learning,</i> (c) <i>Unsupervised Learning,</i> (d) <i>Reinforcement Learning</i> (Manuel , 2019). .....	34
<b>Gambar 24.</b>	Taksonomi algoritma ML (The Ravit Show @ravitjain). .....	37
<b>Gambar 25.</b>	Aplikasi ML pada berbagai Area Telekomunikasi (Wojciech, 2018). .....	40
<b>Gambar 26.</b>	Pemetaan Penerapan AI/ML pada Model Ref OSI (Adaptasi dari Kumar, 2023) .....	42
<b>Gambar 27.</b>	AI-Native (Ericsson, 2023) .....	45
<b>Gambar 28.</b>	<i>F1-Score</i> Deteksi Objek dipengaruhi <i>Bit Rate</i> . .....	47
<b>Gambar 29.</b>	Tingkat <i>explainability</i> berbagai algoritma Supervised ML (Kleyton, <a href="http://holisticai.com">holisticai.com</a> ). .....	49
<b>Gambar 30.</b>	Prediksi Trafik Telekomunikasi menggunakan ML untuk <i>Augmented MIMO Sleep Mode</i> (Ericsson, 2020). .....	50
<b>Gambar 31.</b>	Berbagai kategori KPI pada Jaringan Komunikasi Selular (Madalena, 2022). .....	52
<b>Gambar 32.</b>	Algoritma kNN untuk Regresi (Adaptasi dari Rhys 2020).....	53
<b>Gambar 33.</b>	<i>Ploting</i> dari proses <i>hyperparameter tuning</i> untuk Prediksi (a) Trafik (b) <i>Throughput Downlink</i> .....	54
<b>Gambar 34.</b>	<i>Ploting Ploting</i> Nilai <i>actual</i> trafik vs <i>predicted</i> dengan kNN untuk prediksi (a) Trafik; (b) <i>Throughput Downlink</i> . ....	54
<b>Gambar 35.</b>	<i>Bootstrap aggregating (bagging)</i> dengan <i>decision trees</i> (Rhys, 2020). .....	55
<b>Gambar 36.</b>	<i>Ploting out-of-bag error</i> untuk model RF untuk prediksi (a) Trafik; (b) <i>Throughput Downlink</i> .....	56
<b>Gambar 37.</b>	<i>Ploting</i> nilai <i>actual</i> vs <i>predicted</i> dengan RF untuk prediksi (a) Trafik dan (b) <i>Throughput Downlink</i> .....	57
<b>Gambar 38.</b>	<i>Plotting</i> RMSE terhadap jumlah iterasi pada proses <i>boosting</i> Prediksi (a) Trafik (b) <i>Throughput Downlink</i> .....	59

**Gambar 39.** *Plotting nilai actual vs predicted* dengan XGBoost untuk prediksi (a) Trafik dan (b) *Throughput Downlink* ..... 59

**Gambar 40.** Perbandingan Algoritma ML Observed vs Predicted (a) Trafik; (b) *Throughput Downlink*. ..... 61



# 1 PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi telekomunikasi khususnya komunikasi nirkabel seluler telah memberikan dampak besar pada masyarakat modern, sehingga memudahkan orang untuk tetap terhubung dan berkomunikasi dengan orang lain secara *real-time*. Kemajuan ini memungkinkan masyarakat memiliki akses cepat terhadap informasi, layanan, dan hiburan dari ujung jari mereka. Selain itu, komunikasi seluler juga memfasilitasi munculnya platform media sosial dan alat komunikasi digital lainnya, yang memungkinkan orang terhubung dengan orang lain dalam skala global dan berbagi pengalaman, ide, dan opini. Secara umum, kemajuan dalam teknologi telekomunikasi akan memberikan dampak pada isu-isu sosial dan ekonomi (Berger, 2019).

Evolusi perangkat komunikasi, khususnya telepon seluler, telah mengubah secara drastis cara orang berkomunikasi dan tetap terhubung. Dari perangkat berukuran besar dan memiliki fungsi terbatas hingga ponsel cerdas (*smart phone*) yang ramping dan serbaguna, perangkat komunikasi telah menjadi bagian penting dari masyarakat modern. Ponsel cerdas telah merevolusi cara orang berkomunikasi, memungkinkan konektivitas instan dan berkelanjutan. Perangkat ini telah menjadi alat serbaguna yang tidak hanya memungkinkan panggilan suara dan pesan teks tetapi juga menyediakan akses ke internet, media sosial, dan berbagai aplikasi. Ponsel cerdas menjadi sangat diperlukan baik dalam lingkungan pribadi maupun profesional, memungkinkan orang untuk tetap terhubung, mengatur jadwal, mengakses informasi, dan melakukan tugas saat bepergian (Farooq, 2015).

Dampak teknologi komunikasi nirkabel seluler terhadap masyarakat modern tidak dapat disangkal. Hal ini telah mengubah berbagai aspek kehidupan sehari-hari, mulai dari komunikasi hingga akses informasi, dan sangat memengaruhi interaksi sosial, operasional bisnis, dan produktivitas pribadi. Meluasnya penggunaan teknologi komunikasi seluler juga membawa dampak lingkungan yang penting. Komunikasi nirkabel yang lebih efisien berpotensi mengurangi konsumsi daya (Buzzi, 2014), sehingga mengurangi jejak karbon teknologi digital. Selain itu, teknologi ini telah membuka kemungkinan dan penerapan baru di luar sektor tradisional seperti layanan kesehatan. Industri seperti pertanian, pendidikan, ritel, dan logistik semuanya dapat memperoleh manfaat dari peningkatan komunikasi nirkabel (Kouyoumdjieva, 2017), (Rinaldi, 2021).

Pertimbangan etis dan keamanan data seputar teknologi komunikasi nirkabel juga penting. Komunikasi seluler melibatkan pengelolaan data sensitif yang terkait dengan infrastruktur jaringan dan memastikan privasi, kerahasiaan, dan keamanan pengguna. Perangkat seluler telah menjadi bagian integral dari kehidupan kita sehari-hari, merevolusi cara kita berkomunikasi dan mengakses informasi. Namun, seiring dengan peningkatan konektivitas ini, terdapat peningkatan risiko pelanggaran data, akses tidak sah, dan pelanggaran privasi. Sangat penting bagi individu dan organisasi untuk memahami pentingnya menjaga informasi sensitif dalam komunikasi seluler untuk mengurangi potensi risiko penyalahgunaan data dan menjaga integritas privasi data (Yu, 2020), (Raj, 2020).

Secara keseluruhan, dampak teknologi komunikasi seluler terhadap masyarakat modern sangat besar. Berkat kemajuan teknologi komunikasi seluler, individu memiliki kemampuan untuk melakukan berbagai aktivitas dari mana saja dan kapan saja. Hal ini telah meningkatkan kenyamanan dan produktivitas secara signifikan. Namun demikian, perkembangan telekomunikasi mempunyai dampak yang signifikan terhadap lingkungan masyarakat, dan pemerintahan (Yang, 2016). Seiring dengan kemajuan industri, penting untuk mempertimbangkan dampak lingkungan dari infrastruktur telekomunikasi, termasuk konsumsi energi peralatan jaringan dan pembuangan limbah elektronik. Menerapkan praktik berkelanjutan dalam pengembangan telekomunikasi dapat mengurangi permasalahan lingkungan, seperti penerapan teknologi hemat energi dan mendorong inisiatif daur ulang komponen elektronik.

Dari perspektif sosial, pembangunan telekomunikasi berkelanjutan mencakup jaminan akses yang adil terhadap layanan komunikasi, khususnya di daerah tertinggal dan pedesaan. Menjembatani kesenjangan digital dan mendorong inklusi digital dapat berkontribusi terhadap pembangunan sosial dan pemberdayaan ekonomi (Smith, 2019). Selain itu, industri telekomunikasi mempunyai tanggung jawab untuk menghormati hak asasi manusia, privasi, dan perlindungan data, dengan menekankan pentingnya mengintegrasikan pertimbangan etika ke dalam operasi industri telekomunikasi.

Aspek tata kelola juga sama pentingnya dalam pembangunan telekomunikasi berkelanjutan, yang mencakup kerangka peraturan, transparansi, dan akuntabilitas. Tata kelola yang efektif dapat mendorong

persaingan yang adil, perlindungan konsumen, dan langkah-langkah keamanan siber, serta mendorong ekosistem telekomunikasi yang dapat dipercaya dan tangguh (ITU, 2018). Selain itu, mematuhi praktik bisnis yang etis dan prinsip tanggung jawab sosial perusahaan dapat meningkatkan tata kelola industri secara keseluruhan.

Dengan menggabungkan teknologi ramah lingkungan, mendorong inklusi digital, dan menjunjung tinggi prinsip tata kelola yang kuat, pembangunan telekomunikasi dapat maju secara berkelanjutan, memberikan kontribusi terhadap kesejahteraan bumi, masyarakat, dan perekonomian.

## **1.1 Evolusi Telekomunikasi Nirkabel (*Mobile Broadband*)**

Telekomunikasi mengacu pada pertukaran informasi menggunakan berbagai teknologi dan teknik, serta medium yang beragam. Domain telekomunikasi yang berbeda mencakup komunikasi kabel (seperti telepon rumah dan koneksi internet melalui serat optik atau kabel), komunikasi nirkabel (termasuk telepon seluler dan komunikasi satelit), dan komunikasi optik (menggunakan cahaya untuk mengirimkan data melalui kabel serat optik).

Salah satu bentuk telekomunikasi yang paling populer dan berpengaruh besar pada kehidupan masyarakat adalah komunikasi bergerak seluler nirkabel. Karenanya pada pembahasan perkembangan teknologi telekomunikasi dibatasi pada domain komunikasi bergerak selular saja. Teknologi komunikasi bergerak selular mengalami evolusi berkelanjutan melalui generasi yang berbeda dari 1G hingga 5G saat ini (Hodara dkk, 2021) menghasilkan serangkaian kemajuan teknologi yang signifikan. Generasi 3G dan selanjutnya menandai era baru yang dikenal sebagai era *mobile broadband*.

### **1.1.1 Generasi Pertama (1G)**

Dua generasi pertama komunikasi bergerak seluler, 1G dan 2G, meletakkan dasar bagi teknologi seluler yang kita gunakan saat ini. Jaringan generasi Pertama (1G) diluncurkan pada tahun 1980-an dan menggunakan teknologi analog untuk mengirimkan sinyal dan penerapannya hanya untuk panggilan suara. Dikarenakan sifat sinyal analog, jaringan 1G hanya dapat mendukung sejumlah terbatas pengguna secara bersamaan. Hal ini sering menyebabkan

panggilan terputus dan kongesti (*congestion*) serta sinyal analog rentan terhadap gangguan interferensi dan kondisi cuaca, yang mengakibatkan kualitas panggilan buruk. Selain itu, jaringan 1G tidak memiliki fitur keamanan yang kuat, sehingga panggilan rentan terhadap penyadapan. Terlepas dari keterbatasan ini, 1G merupakan sebuah langkah maju yang signifikan, karena memungkinkan orang untuk melakukan panggilan telepon seluler untuk pertama kalinya.

### **1.1.2 Generasi Kedua (2G)**

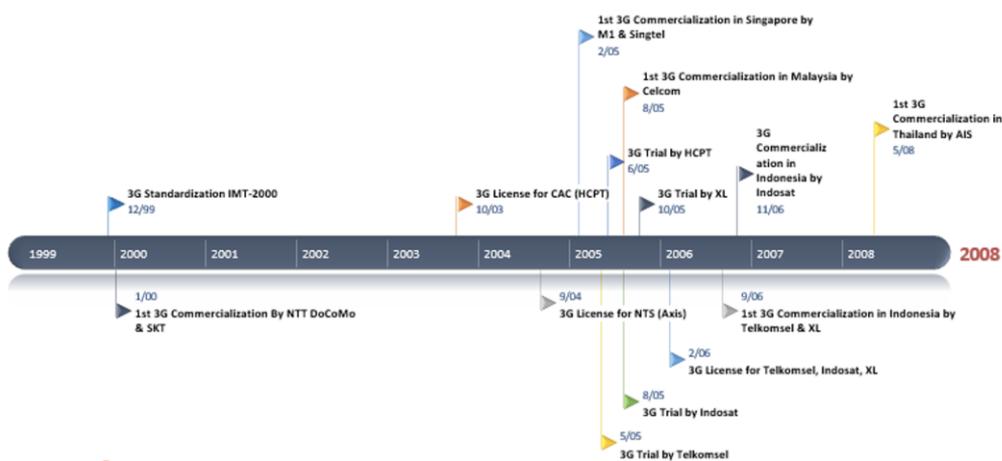
Jaringan 2G, yang diluncurkan pada tahun 1990-an, mengatasi banyak kekurangan 1G dengan memperkenalkan teknologi digital. Sinyal digital tidak terlalu rentan terhadap interferensi dan dapat dikompresi dengan lebih efisien, sehingga menghasilkan beberapa perbaikan. Karena teknologi digital memungkinkan jaringan 2G mendukung lebih banyak pengguna secara bersamaan, mengurangi kongesti dan terputusnya panggilan. Selain itu, sinyal digital memberikan panggilan suara yang lebih jelas dan andal dibandingkan sinyal analog. Berbeda dengan generasi sebelumnya, jaringan 2G memperkenalkan enkripsi untuk melindungi panggilan dari penyadapan.

Transisi dari platform analog di 1G ke digitalisasi di era 2G menandai perubahan mendasar, dengan suara menjadi layanan utama dan pesan teks muncul sebagai nilai tambah utama. Inovasi SMS ini diterima secara luas oleh pasar dan menjadi fitur layanan seluler yang sukses secara tak terduga. Selama periode 2G, sistem komunikasi seluler global (GSM) menonjol sebagai standar paling populer di seluruh dunia, menjangkau lebih dari 70% pelanggan seluler global (Suryanegara, 2023). 2G merupakan lompatan besar dalam komunikasi bergerak seluler, meletakkan dasar bagi pengembangan jaringan 3G, 4G, dan 5G yang kita gunakan saat ini.

### **1.1.3 Generasi Ketiga (3G)**

Komunikasi seluler generasi ketiga (3G), merupakan kemajuan signifikan dibandingkan pendahulunya, 1G dan 2G. Sistem 3G menawarkan kecepatan data yang lebih cepat, kualitas suara yang lebih baik, dan memungkinkan aplikasi baru seperti akses internet seluler dan panggilan video. Teknologi 3G terutama berdasarkan pada *Wideband Code Division Multiple Access* (WCDMA) dan CDMA2000 dengan kecepatan hingga 2 Mbps (dibandingkan dengan 144

kbps untuk 2G). Berbeda dengan 2G yang menggunakan teknologi *circuit switching*, 3G menggunakan transmisi data berbasis paket (*packet switching*). Hal ini memungkinkan penggunaan sumber daya jaringan yang lebih efisien dan peningkatan kapasitas. 3G membuka pintu bagi sejumlah besar aplikasi dan layanan baru, seperti MMS, panggilan video, *mobile gaming*, termasuk akses internet seluler. Kecepatan data yang lebih tinggi berarti kecepatan transfer data yang jauh lebih cepat, memungkinkan penjelajahan web lebih lancar, pengunduhan lebih cepat, dan pengalaman *streaming* yang lebih baik. Adopsi jaringan 3G yang meluas membuka jalan bagi pengembangan teknologi komunikasi seluler yang lebih cepat dan canggih seperti 4G dan 5G dan dikenal sebagai *mobile broadband*. Meskipun jaringan 3G sudah mulai dihapuskan di banyak belahan dunia demi mendukung teknologi baru ini, jaringan 3G masih memainkan peran penting dalam menyediakan konektivitas seluler di banyak kawasan.



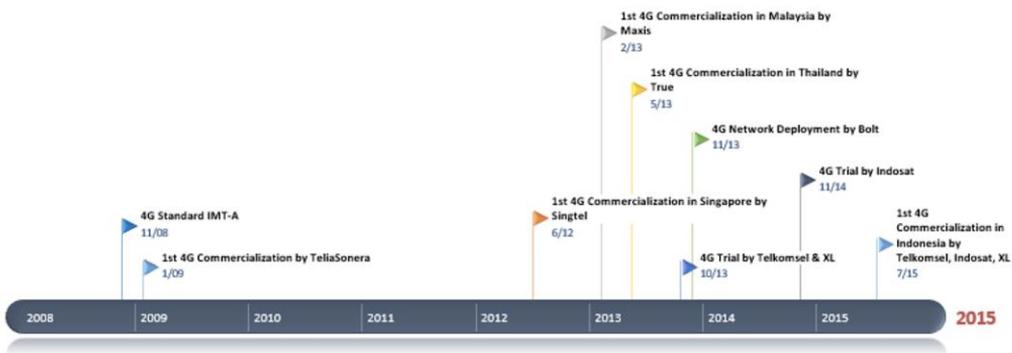
Gambar 1. Sejarah Perkembangan 3G di Indonesia (LPPM ITB, 2018).

### 1.1.4 Generasi Keempat (4G)

Pengenalan komunikasi seluler 4G menandai tonggak penting dalam evolusi teknologi nirkabel. Sebagai jaringan seluler generasi keempat, 4G mewakili lompatan maju dalam hal kecepatan, keandalan, dan kinerja keseluruhan dibandingkan pendahulunya. Inovasi dari 3G ke 4G difokuskan pada peningkatan kecepatan data dengan mengembangkan aspek teknis *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) dan *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) sebagai inti dari teknologi radio yang digunakan. Peningkatan teknis mencakup *bandwidth* yang lebih besar, mekanisme akses jamak, dan

penggunaan *turbo coding* sebagai skema pengkodean saluran. Hal ini memungkinkan kecepatan data puncak hingga 100 megabit per detik (Mbps). Pengenalan 4G telah mengintensifkan penyebaran besar-besaran platform layanan digital di seluruh dunia. Teknologi 4G memungkinkan pengguna merasakan kecepatan transfer data yang lebih cepat, latensi lebih rendah, dan peningkatan kapasitas jaringan secara keseluruhan. Kemajuan ini telah menciptakan peluang baru untuk berbagai aplikasi, mulai dari peningkatan *streaming* video seluler dan *game online* hingga *Internet of Things* dan infrastruktur *smart city*.

Dampak teknologi 4G melampaui pengguna individu, memengaruhi industri dan perekonomian dalam skala global. Dampaknya yang luas telah mengubah cara orang berkomunikasi, bekerja, dan berinteraksi dengan dunia di sekitar mereka. Dampaknya tidak hanya terbatas pada teknologi, tetapi juga memiliki implikasi sosio-ekonomi yang membentuk dunia modern. Pada tahun 2022, 4G menjadi teknologi komunikasi seluler yang dominan secara global, termasuk di Indonesia yang mencakup 84% dari seluruh pelanggan seluler (Twimbit, 2023). Namun, peluncuran 5G, teknologi seluler generasi berikutnya, menawarkan kecepatan lebih tinggi dan latensi lebih rendah. Meskipun jaringan 4G masih diperluas di beberapa wilayah, jaringan tersebut diperkirakan akan dihapuskan secara bertahap dan digantikan dengan 5G di tahun-tahun mendatang.



Gambar 2. Sejarah Perkembangan 4G di Indonesia (LPPM ITB, 2018).

### 1.1.5 Generasi Kelima (5G)

Teknologi nirkabel generasi kelima, yang biasa disebut 5G, merupakan fase penting berikutnya dalam evolusi komunikasi seluler. Dengan memanfaatkan

kemampuan pendahulunya, 5G bertujuan untuk merevolusi cara kita terhubung dan berinteraksi dengan dunia di sekitar kita. Dengan kecepatan ultra-cepat, latensi sangat rendah, dan kemampuan untuk menghubungkan sejumlah besar perangkat secara bersamaan, 5G siap membuka era baru inovasi dan kemajuan di berbagai industri (ITU-R, 2015).

Teknologi 5G mewakili lompatan maju yang signifikan dari kemampuan komunikasi seluler generasi sebelumnya. Meskipun jaringan 4G terutama berfokus pada penyediaan kecepatan internet yang lebih cepat untuk perangkat seluler, 5G dirancang untuk menjadi kekuatan transformatif yang lebih dari sekadar meningkatkan kualitas ponsel pintar kita. Potensi dampak 5G sangat luas, meliputi bidang-bidang seperti layanan kesehatan, transportasi, manufaktur, hiburan, dan lain-lain. Di luar inovasi-inovasi inti ini, 5G juga membuka jalan bagi kemajuan lebih lanjut dengan konsep “*Network Slicing*”. Hal ini memungkinkan operator untuk mempartisi jaringan secara virtual untuk memenuhi kebutuhan spesifik, memberikan kinerja yang disesuaikan untuk berbagai aplikasi.

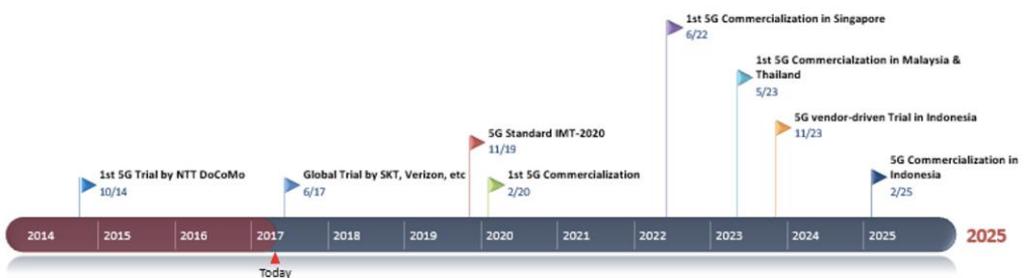
Salah satu fitur utama yang membedakan 5G dari pendahulunya adalah kemampuannya menawarkan kecepatan data yang jauh lebih cepat (*Enhanced Mobile Broadband/eMBB*). Meskipun jaringan 4G biasanya memberikan kecepatan pengunduhan puncak sekitar 100 Mbps, 5G berpotensi mencapai kecepatan 100 kali lebih cepat, dengan perkiraan berkisar antara 1 hingga 10 Gbps. Peningkatan kecepatan yang luar biasa ini memiliki kekuatan untuk mendefinisikan ulang cara kita mengonsumsi dan mengirimkan data, sehingga membuka kemungkinan baru untuk layanan dan aplikasi yang memerlukan konektivitas berkecepatan tinggi.

Selain kecepatan yang lebih cepat, teknologi 5G juga menawarkan latensi yang jauh lebih rendah dibandingkan generasi sebelumnya, dikenal sebagai *Ultra-reliable and Low Latency Communication (UrLLC)*. Latensi mengacu pada waktu yang diperlukan data untuk berpindah dari sumber ke tujuannya. Dengan 5G, latensi diharapkan dapat dikurangi hingga serendah 1 milidetik, sebuah peningkatan besar dibandingkan 20 milidetik atau lebih yang biasanya dialami jaringan 4G. Latensi yang sangat rendah ini merupakan terobosan baru dalam aplikasi yang memerlukan respons *real-time*, seperti kendaraan otonom, operasi jarak jauh, dan pengalaman *augmented reality*.

Karakteristik lain yang menentukan dari 5G adalah kemampuannya untuk mendukung sejumlah besar perangkat yang terhubung dalam wilayah tertentu. Kemampuan ini, yang dikenal sebagai komunikasi tipe mesin masif (*massive Machine Type Communication/mMTC*), sangat penting untuk mengantisipasi lonjakan perangkat yang terhubung seiring dengan terus berkembangnya *Internet of Things*. Dengan 5G, diproyeksikan hingga 1 juta perangkat dapat didukung dalam satu kilometer persegi, membuka jalan bagi kota pintar (*smart city*) yang saling terhubung, otomasi industri, dan sejumlah aplikasi IoT lainnya.

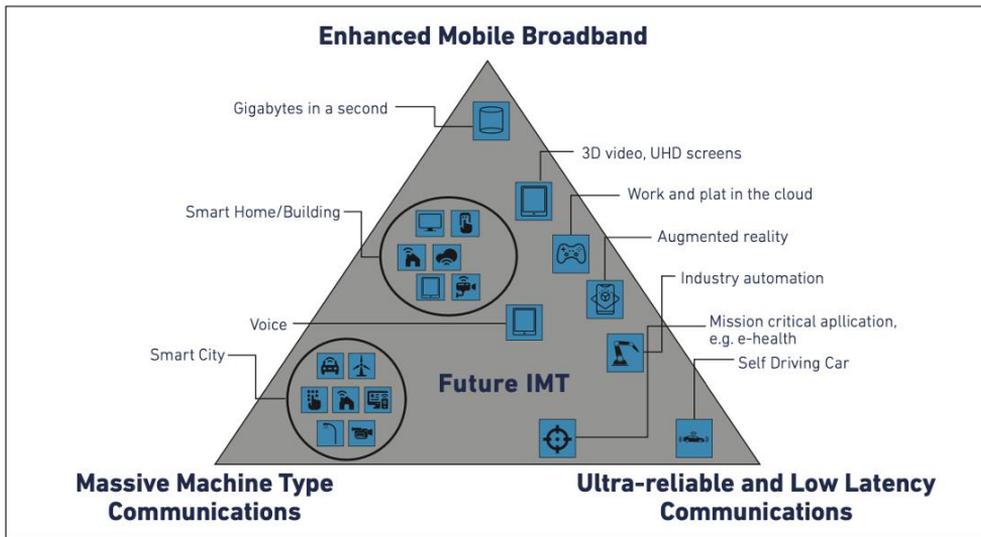
Sebagai landasan bagi gelombang baru inovasi teknologi, 5G berpotensi mendorong kemajuan yang belum pernah terjadi sebelumnya di berbagai sektor. Dalam layanan kesehatan, kombinasi transmisi data berkecepatan tinggi dan latensi rendah dapat memungkinkan pemantauan pasien jarak jauh (*telemedis*), dan prosedur bedah yang dilakukan oleh sistem robotik di bawah bimbingan dokter ahli yang berlokasi ber km-km jauhnya. Sektor transportasi dapat mengalami perubahan transformatif dengan munculnya kendaraan terhubung berkemampuan 5G dan infrastruktur cerdas, yang mengarah pada peningkatan keselamatan jalan raya, manajemen lalu lintas, dan sistem transportasi umum yang lebih efisien.

Manufaktur dan logistik juga mendapat manfaat dari 5G, dengan janji komunikasi latensi rendah yang sangat andal yang memfasilitasi penerapan robot canggih, jalur produksi otomatis, dan pelacakan inventaris *real-time*. Industri hiburan juga berpotensi untuk melakukan revolusi, karena kecepatan tinggi dan latensi rendah 5G membuka batasan baru untuk pengalaman yang imersif, *streaming* langsung konten definisi tinggi, dan aplikasi *augmented/virtual reality*.



Gambar 3. Prediksi Perkembangan 5G di Indonesia (LPPM ITB, 2018).

5G mewakili perubahan besar dalam lanskap komunikasi seluler, menawarkan kecepatan yang belum pernah terjadi sebelumnya, latensi rendah, dan kapasitas untuk menghubungkan banyak perangkat. Dampaknya akan mengubah industri, memungkinkan layanan inovatif, dan mengubah cara kita berinteraksi dengan teknologi. Ketika 5G terus diluncurkan di seluruh dunia, kemungkinan yang terbuka tidak terbatas, mengantarkan era konektivitas dan inovasi yang belum pernah kita lihat sebelumnya.



Source: ITU (2015).

**Gambar 4.** Use-cases Aplikasi 5G. (ITU 2015)

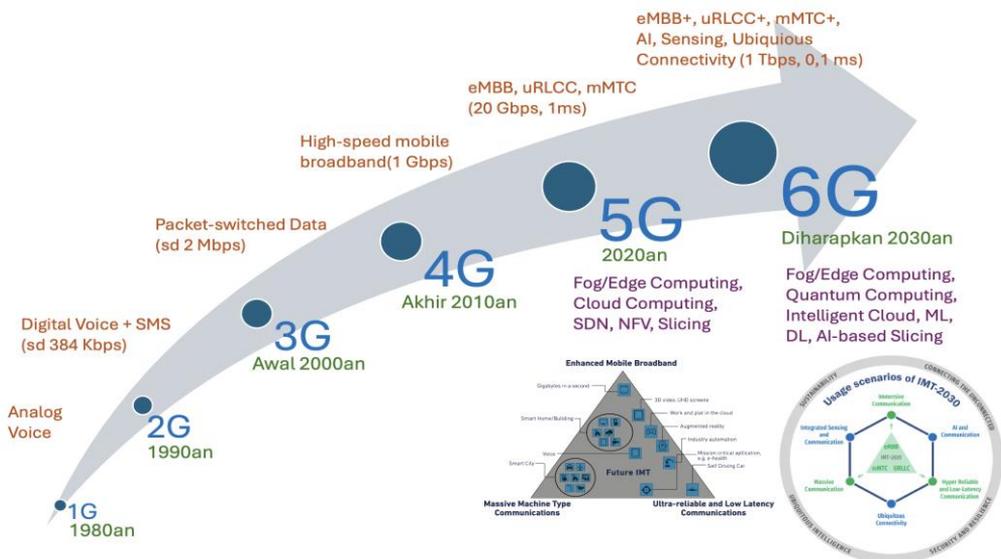
### 1.1.6 Generasi Keenam (6G)

Walaupun teknologi nirkabel generasi keenam 6G sebagian besar masih bersifat spekulatif dan masih dalam tahap awal penelitian dan pengembangan, tetapi berdasarkan tren dan prediksi saat ini, 6G diharapkan akan membawa kemajuan lebih jauh terutama dalam hal kecepatan data, latensi, konektivitas, efisiensi energi, dan kecerdasan dibandingkan generasi sebelumnya (ITU-R, 2023). Dalam hal kecepatan data 6G diperkirakan akan mencapai atau melampaui 100 Gbps, yang jauh lebih cepat dibandingkan 10 Gbps yang ditawarkan oleh 5G. Sementara terkait latensi, 6G diharapkan mencapai latensi sub-milidetik, yang lebih rendah dibandingkan latensi 1 ms pada 5G sehingga memungkinkan komunikasi hampir seketika untuk aplikasi yang sensitif terhadap waktu. Dari sisi konektivitas dan cakupan, 6G akan

memperluas cakupan dan skala konektivitas perangkat, mendukung IoE, di mana hampir setiap perangkat saling terhubung dengan cara yang cerdas. 6G juga menawarkan cakupan yang benar-benar global dengan mengintegrasikan jaringan satelit dan terrestrial. 6G kemungkinan besar akan menggunakan pita frekuensi yang lebih tinggi, seperti gelombang terahertz, yang dapat membawa lebih banyak data, sehingga menyediakan *bandwidth* dan kapasitas yang lebih besar.

Sesuai dengan tuntutan pembangunan dan operasional berkelanjutan Jaringan 6G diharapkan akan lebih hemat energi dibandingkan 5G. Selanjutnya seiring dengan teknologi *Artificial Intelligence* (AI) dan *Machine Learning* (ML) yang semakin mapan 6G akan sangat mengintegrasikan kecerdasan buatan untuk pengoperasian jaringan, meningkatkan kemampuan seperti pemeliharaan prediktif, optimalisasi jaringan otomatis, dan alokasi sumber daya cerdas. Dengan peningkatan kemampuan dari 6G seperti ini memungkinkan realisasi aplikasi yang lebih canggih kedepan, seperti komunikasi holografik dengan ketelitian tinggi, pengalaman *augmented reality* dan *virtual reality* yang canggih, serta konektivitas IoT yang lancar.

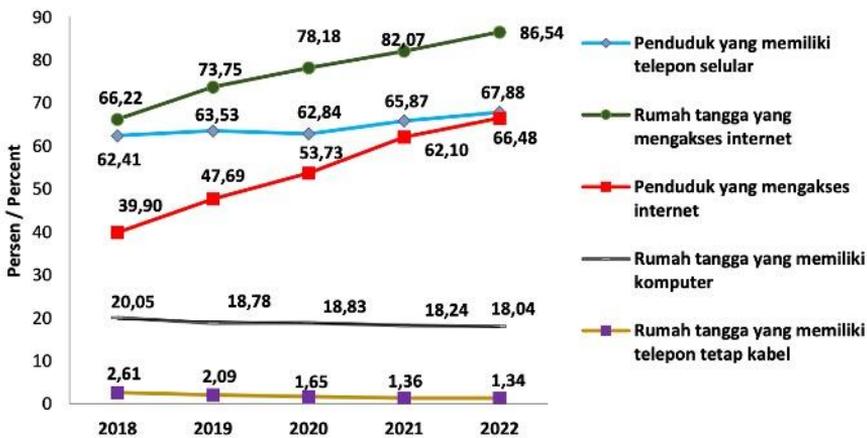
*Milestone* serta perbandingan dari kemampuan, fitur, dan inovasi dari evolusi teknologi nirkabel dari 1G sampai dengan target 6G diperlihatkan pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Evolusi Teknologi Nirkabel (adaptasi dari berbagai sumber).

## 1.2 Landscape Telekomunikasi Indonesia

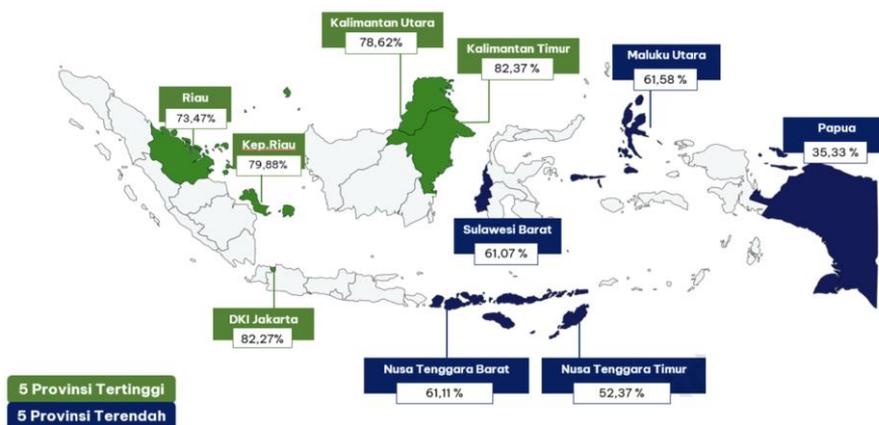
*Landscape* telekomunikasi Indonesia mengalami perkembangan dan transformasi yang sangat pesat dalam lima tahun terakhir. Indikator yang paling pesat terlihat pada penggunaan Internet dalam rumah tangga dari 66,22% pada tahun 2018 meningkat mencapai angka 86,54 % di tahun 2022. Pertumbuhan penggunaan Internet dalam rumah tangga ini diikuti pula oleh pertumbuhan penduduk yang memiliki telepon seluler, yang meningkat dari 62,41% pada tahun 2018 meningkat mencapai 67,88% pada tahun 2022 (BPS, 2023). Dari sisi jumlah, pada tahun 2023 jumlah penduduk Indonesia mencapai 276,4 juta, sementara jumlah pelanggan telepon seluler mencapai 353,8 Juta, sehingga jumlah telepon selular 128% melebihi jumlah populasi, dengan pengguna Internet mencapai 212,9 juta.



Gambar 6. Pengguna TIK di Indonesia Tahun 2018 – 2022 (BPS, 2023).

## 1.3 Menjembatani Kesenjangan Digital (*Digital Divide*)

Walaupun jumlah telepon selular di Indonesia mencapai 353,8 juta melebihi jumlah populasi, tetapi kepemilikan telepon selular di perkotaan jauh lebih tinggi daripada di pedesaan. Di tahun 2022, ada 73,58% penduduk perkotaan telah memiliki/menguasai telepon selular. Adapun di daerah pedesaan, hanya 60,18% penduduk memiliki/menguasai telepon selular (BPS, 2023). Selain kebutuhan aktivitas yang membutuhkan dukungan telepon selular lebih tinggi di perkotaan faktor lain lebih rendahnya penetrasi telepon selular di pedesaan adalah karena infrastruktur telekomunikasi relatif masih terbatas di daerah pedesaan, terlebih daerah 3T (Terdepan, Terluar, Tertinggal).



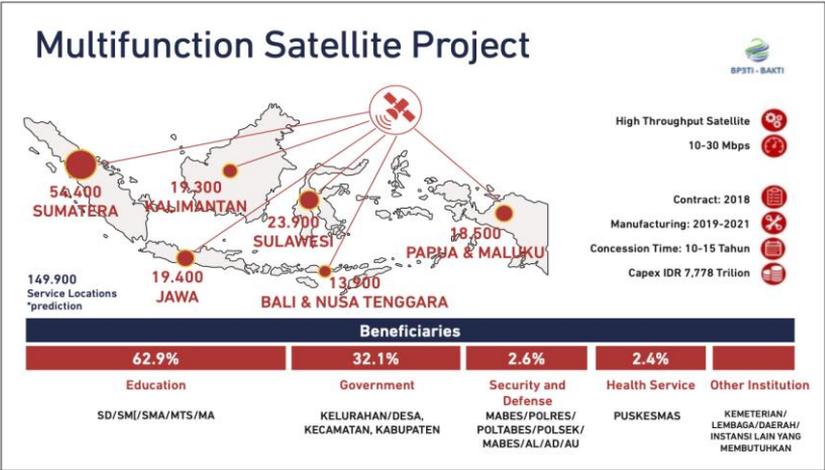
Sumber : Survei Sosial Ekonomi Nasional 2022, BPS

**Gambar 7.** Persentase Penduduk yang Memiliki/Menguasai Telepon Seluler menurut Provinsi Tahun 2022 (BPS, 2023).

Terlepas dari kemajuan telekomunikasi dan potensi pertumbuhannya di daerah perkotaan, Indonesia perlu meningkatkan konektivitas dan meminimalkan kesenjangan digital untuk daerah pedesaan atau di wilayah 3T (Terdepan, Terluar, Tertinggal) dan wilayah non-3T yang tidak layak secara bisnis/keuangan (*non- financially feasible*). Dalam industri telekomunikasi, *Universal Service Obligation* (USO) merupakan mekanisme kebijakan yang bertujuan untuk menjembatani kesenjangan digital. Pada daerah-daerah tersebut, pemerintah harus menunjukkan afirmasi dan hadir dalam menghubungkan infrastruktur digital di Indonesia. Badan Aksesibilitas Telekomunikasi dan Informasi (BAKTI), sebuah badan layanan umum di bawah Kementerian Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia (KOMINFO) telah ditunjuk sebagai pengelola dana USO yang berasal dari kontribusi operator telekomunikasi untuk membiayai pembangunan infrastruktur dan layanan telekomunikasi di daerah 3T. Untuk menghadirkan konektivitas di daerah 3T sebagai upaya akselerasi transformasi digital, BAKTI telah menargetkan membangun infrastruktur telekomunikasi di 150.000 lokasi rural di Indonesia (Kominfo, 2022).

Untuk mencapai angka tersebut, BAKTI telah melaksanakan berbagai program ([baktikominfo.id](http://baktikominfo.id)) antara lain pembangunan jaringan fiber optik Palapa Ring, dua program utama akses Internet, yaitu *Broadband Backhaul* (BB) dan “Akses Internet” (AI), serta program Satelit SATRIA, yaitu penyediaan layanan kapasitas satelit telekomunikasi dalam rangka

mendukung program BAKTI menggunakan teknologi *High Throughput Satellite* (HTS) dengan kapasitas 150 Gbps. SATRIA menjadi solusi tepat guna dalam menjangkau daerah terpencil yang tidak terjangkau sehingga membantu mengentaskan kesenjangan akses *broadband* internet. Indonesia merupakan negara ke-4 yang memiliki satelit dengan teknologi *very high throughput* setelah Luksemburg, Kanada, dan Amerika Serikat [Kominfo, 2022].

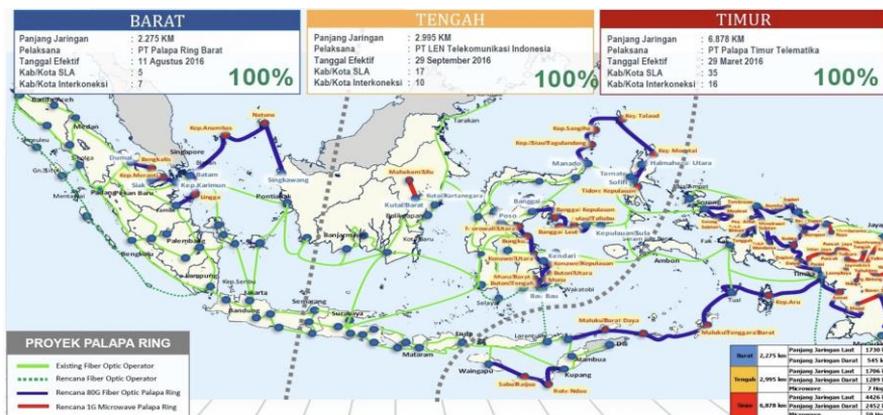


Source: BAKTI (2020).

Gambar 8. Proyek Satelit Satria-1 (BAKTI 2020).

Palapa Ring merupakan upaya pemerintah dalam membangun ketersediaan layanan jaringan serat optik yang menghubungkan seluruh kabupaten/kota, dengan menghubungkan 57 kabupaten/ kota di Indonesia demi pemerataan akses pitalebar (*broadband*) di Indonesia. Proyek Palapa Ring dibagi menjadi tiga paket yaitu Barat, Tengah dan Timur. Dengan total panjang kabel 12.148 KM.

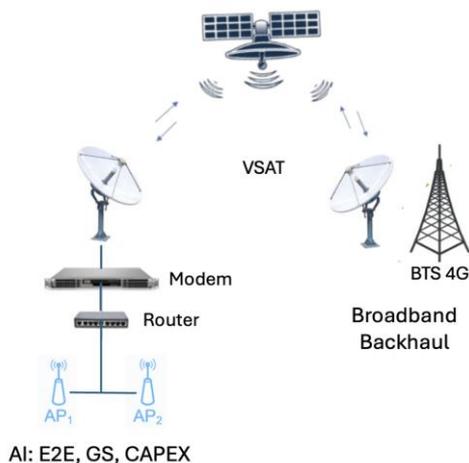
Program *Broadband Backhaul* (Program BB) menggunakan teknologi seluler sebagai aksesnya dengan penyediaan *Base Transceiver Station* (BTS) 4G menggunakan satelit sebagai *backbone* dan *backhaul*-nya. Penyediaan BTS 4G BAKTI merupakan kolaborasi bersama antara KOMINFO dengan operator seluler untuk menyediakan akses seluler 4G di wilayah 3T dan wilayah non-3T yang tidak layak secara bisnis/keuangan (*non-financially feasible*). Sampai pertengahan tahun 2024 telah dibangun BTS 4G di 4.674 lokasi (BAKTI).



Gambar 9. Proyek Palapa Ring (Bakti).

Program Akses Internet (AI) menggunakan satelit sebagai *backbone* dan *backhaul*-nya serta menggunakan spektrum/Wi-Fi yang tidak berlisensi sebagai aksesnya. Dari segi jumlah penerapan, program AI mengungguli program BB dan saat ini dijadikan program utama di BAKTI. Program AI sendiri terbagi menjadi tiga sub-program, yaitu *End-to-End* (EtE), *Ground Segment* (GS), dan Belanja Modal (CAPEX). Program EtE merupakan program AI pertama dari BAKTI, di mana pada skema ini semua layanan internet disediakan oleh satu layanan penyedia, dari *backbone* satelit hingga akses internet. Selanjutnya untuk mengurangi beban anggaran, BAKTI memperkenalkan skema akses Internet yang kedua yang disebut sebagai skema *Ground Segment* (GS). Setelah muncul skema GS, maka jumlah lokasi EtE akan dibatasi dan dikurangi secara bertahap. Berbeda dengan program EtE di mana penyedia bertanggung jawab atas semua layanan, pada program GS penyedia layanan dibagi menjadi dua penyedia. Penyedia pertama akan bertanggung jawab atas layanan satelit atau segmen luar angkasa dan penyedia kedua akan bertanggung jawab atas segmen darat. Namun, perangkatnya berada di lokasi pedesaan masih dimiliki oleh penyedia. Program akses internet terakhir yaitu, program CAPEX, telah diidentifikasi sebagai salah satu program yang akan lebih menghemat anggaran BAKTI. Sedangkan arsitektur sistemnya mirip dengan program GS, hanya saja pada program CAPEX perangkat di pedesaan dimiliki oleh BAKTI dan pengadaannya menggunakan APBN (Ismawan dkk, 2024). Untuk program Akses Internet saat ini (pertengahan 2024) telah dibangun Akses Internet (AI) di 30.000 lokasi di berbagai titik fasilitas publik. Untuk akhir tahun 2024 akan

dibangun 20.000 lokasi AI baru, serta 12.914 lokasi akan migrasi ke SATRIA-1 dari target total 150.000 lokasi (BAKTI).



**Gambar 10.** Program Akses Internet (AI) dan Program Backhaul BAKTI.

## 1.4 *Broadband* dan Pertumbuhan Ekonomi

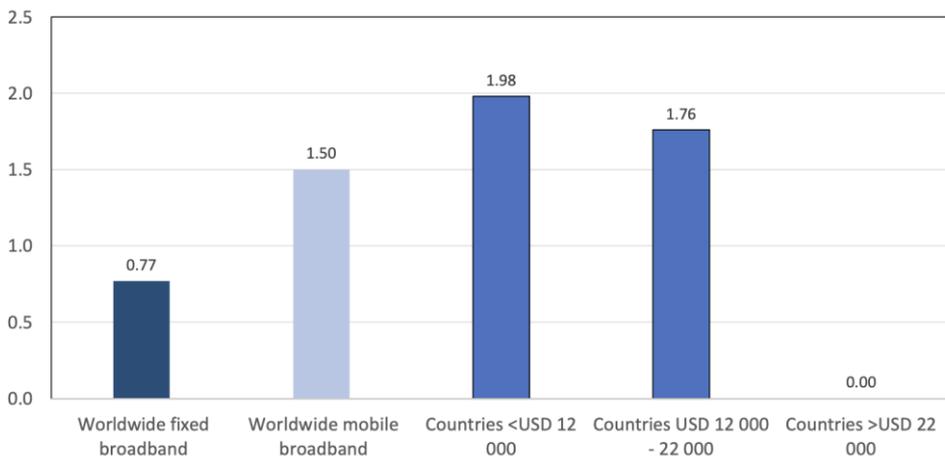
Industri telekomunikasi memainkan peran penting dalam menghubungkan masyarakat dan perusahaan di seluruh dunia, memungkinkan pertumbuhan ekonomi, dan mendorong transformasi digital. Akses Internet, khususnya akses Internet *broadband*, membuka potensi penuh pemanfaatan Internet, memungkinkan pengalaman *online* yang lebih kaya dan efisien. Selain itu ketersediaan akses *broadband* memungkinkan akses aplikasi dengan penerapan teknologi mutakhir seperti *fintech*, *blockchain*, dan AI. Saat ini Indonesia menuduki peringkat kelima dalam jumlah *download Mobile App* dibawah Cina, India, Amerika Serikat, dan Brazil (Kominfo, 2022).

Tidak ada definisi *broadband* yang disepakati secara internasional. Menurut ITU (ITU, 2011), *broadband* mengacu pada kecepatan minimum 256 kb/s, sementara OECD telah mendefinisikan bahwa *broadband* intinya sebagai koneksi yang bukan *dial-up*, hal ini menyiratkan bahwa kecepatan tidak terlalu penting, melainkan fakta bahwa koneksi harus selalu ON "*always-on*" (OECD, 2008). Terdapat dua cara untuk mendapatkan akses *broadband* yaitu melalui *mobile broadband* dan melalui *fixed broadband*. Pada *fixed broadband* ada dua teknologi utama untuk memberikan akses internet berkecepatan tinggi ke lokasi tertentu, yaitu *Broadband Akses Tetap kabel* (menggunakan serat optik, kabel koaksial, atau kabel tembaga/DSL) dan Akses

Nirkabel Tetap (FWA). FWA adalah pendekatan yang relatif baru yang memanfaatkan teknologi nirkabel untuk memberikan akses internet *broadband*. Tidak seperti *broadband* seluler yang menggunakan jaringan seluler, FWA membuat koneksi nirkabel khusus antara *fixed base station* (seperti BTS) dan unit penerima yang dipasang di lokasi pelanggan. Hal ini menghilangkan kebutuhan akan kabel fisik ke tempat pengguna.

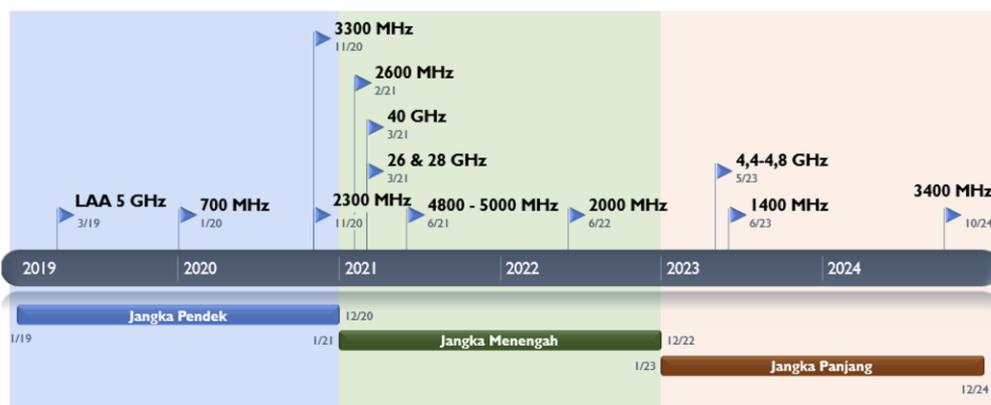
Akses *mobile broadband* di Indonesia tumbuh lebih cepat dibandingkan dengan akses *fixed broadband*, di mana data pada tahun 2023 menunjukkan bahwa 94,2 % akses *broadband* di Indonesia dilakukan via mobile selular (3G, 4G, 5G) (Kemp, 2023). Penelitian telah menunjukkan bahwa ada korelasi positif antara penetrasi *broadband* dengan pertumbuhan PDB dan penciptaan lapangan kerja. Model ekonometrik pada studi yang dilakukan ITU pada tahun 2020 menunjukkan bahwa TIK mempunyai dampak ekonomi yang signifikan (ITU, 2021) sebagai berikut.

- Peningkatan penetrasi *fixed broadband* sebesar 10% mendorong pertumbuhan PDB per kapita sebesar 0,77% (lebih tinggi di negara maju);
- Peningkatan penetrasi *broadband* seluler sebesar 10% menghasilkan pertumbuhan PDB per kapita sebesar 1,50% (lebih tinggi di negara-negara berkembang);
- Peningkatan digitalisasi sebesar 1% menghasilkan pertumbuhan PDB per kapita sebesar 0,133%.



**Gambar 11.** Dampak Peningkatan 10% Penetrasi Broadband Terhadap Pertumbuhan PDB (ITU, 2021).

Seiring peningkatan jumlah pelanggan *broadband*, khususnya pengguna ponsel pintar, dan ketersediaan paket data yang terjangkau dari operator telekomunikasi, meningkatkan penggunaan dan popularitas layanan *Over-the-Top* (OTT), seperti *WhatsApp*, *Instagram*, dan *YouTube*. Pada tahun 2023 pengguna aktif media sosial di Indonesia mencapai 167,0 juta (Howe, 2023). Pengguna Internet di Indonesia juga menghabiskan waktu yang sangat tinggi setiap harinya. Waktu harian yang dihabiskan menggunakan internet di semua perangkat (ponsel, komputer, gawai) adalah 7 jam 42 menit, di mana 63,4% dari terhadap total waktu internet harian ini diakses via ponsel. Konsekuensinya, konsumsi data juga meroket, pada tahun 2023, rata-rata konsumsi data bulanan per pengguna di Indonesia melampaui 20 GB (Howe, 2023). Sementara dari kecepatan Internet di Indonesia masih perlu ditingkatkan, di mana saat ini rata-rata mencapai 17,27 Mbps di bawah rata-rata dunia 33,97 Mbps (Kominfo, 2022).



**Gambar 12.** Strategi untuk pemanfaatan pita-pita eksisting *mobile broadband* di Indonesia (LPPM ITB, 2018).

Usaha lain yang telah dilakukan Pemerintah Indonesia untuk pertumbuhan dan peningkatan kualitas *broadband* adalah dengan program *Digital Dividen*. Program ini dilaksanakan dengan melakukan digitalisasi penyiaran untuk mendapatkan *digital dividend*, yaitu spektrum frekuensi radio yang tersedia setelah transisi dari penyiaran analog ke digital. Dengan perubahan ini, spektrum frekuensi *digital dividend* dapat digunakan untuk mengembangkan infrastruktur jaringan nirkabel *broadband*, seperti 4G dan 5G, yang dapat meningkatkan kecepatan dan kapasitas internet. Terlebih frekuensi UHF yang diperoleh melalui *digital dividend* memiliki sifat

propagasi yang baik, memungkinkan untuk mencapai daerah pedesaan dan terpencil yang sebelumnya kurang terjangkau.

Strategi untuk pemanfaatan pita-pita eksisting *mobile broadband* diperlihatkan pada Gambar 12.

## 1.5 Transformasi Digital/Ekosistem Digital

Indonesia mempunyai visi untuk masuk pada urutan 7 ekonomi terbesar dunia pada tahun 2045 (Bappenas, 2019). Untuk mencapai ini, transformasi digital akan menjadi katalis yang sangat penting dalam perjalanan ini yang akan mendorong Indonesia berubah dari negara konsumen menjadi negara produsen. Transformasi digital merupakan perubahan yang berhubungan dengan penerapan teknologi digital serta mengoptimalkan penggunaan teknologi informasi dan komunikasi (TIK) dalam semua aspek kehidupan masyarakat. Infrastruktur TIK sebagai landasan utama menuju digitalisasi nasional, harus dijamin untuk dapat dinikmati hingga ke seluruh pelosok, sehingga berbagai aplikasi dan konten yang baik dapat diakses dan dimanfaatkan masyarakat. Infrastruktur Telekomunikasi adalah infrastruktur fisik konektivitas nasional mendukung infrastruktur digital.

Negara-negara di seluruh dunia berlomba-lomba memanfaatkan peluang yang ditawarkan oleh digitalisasi. Di tingkat global, pengembangan ekonomi digital telah menjadi bagian penting dari Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (TPB) PBB. Pada Pertemuan Tahunan Forum Ekonomi Dunia di bulan Mei 2022, para pemimpin dunia sepakat bahwa teknologi akan menjadi kunci untuk mencapai TPB (Chen dkk, 2023).

Pemerintah sudah membuat Kerangka Visi Indonesia Digital 2045 (Kominfo, 2023), merupakan dokumen strategi yang memuat rekomendasi arah kebijakan dan strategi nasional di bidang digital. Diluncurkan pada 13 September 2023 oleh Kementerian Komunikasi dan Informatika bertujuan untuk mengoptimalkan manfaat perkembangan teknologi digital bagi pembangunan ekonomi, sosial, dan kemasyarakatan Indonesia di masa depan. Seperti terlihat pada Gambar 13, ada tiga pilar utama untuk mendukung Visi Indonesia Digital 2045, yaitu Pemerintahan Digital, Ekonomi Digital dan Masyarakat Digital.



**Gambar 13.** Kerangka Visi Indonesia Digital 2045 (Kominfo, 2023).

Terkait Pemerintahan Digital telah diterbitkan Peraturan Presiden Nomor 95 Tahun 2018 tentang Sistem Pemerintahan Berbasis Elektronik (SPBE). SPBE di Indonesia adalah penyelenggaraan pemerintahan yang memanfaatkan teknologi informasi dan komunikasi (TIK) untuk memberikan layanan kepada Instansi pemerintah, Aparatur Sipil Negara (ASN), Masyarakat, dan Pelaku usaha. SPBE pada instansi pemerintah bertujuan untuk mempermudah koordinasi dan kolaborasi antar instansi, meningkatkan efisiensi dan efektivitas kerja. Sementara SPBE bagi Aparatur Sipil Negara (ASN) bertujuan mempermudah proses administrasi dan pelayanan publik, meningkatkan kinerja dan akuntabilitas. Lebih lanjut, manfaat SPBE bagi masyarakat adalah untuk mempermudah akses terhadap informasi dan layanan publik, meningkatkan kualitas hidup. Dan yang terakhir SPBE akan bermanfaat juga bagi pelaku usaha untuk mempermudah perizinan usaha dan kegiatan ekonomi, meningkatkan daya saing. Dengan diterapkannya SPBE akan terwujud tata kelola pemerintahan yang efektif dan efisien. Untuk implementasi SPBE perlu dukungan infrastruktur konektivitas internet dan *data center* yang handal serta pengembangan berbagai aplikasi.

Ekonomi digital secara garis besar adalah konsep ekonomi yang menggunakan teknologi digital sebagai elemen kunci dalam berbagai

aktivitas ekonomi. Ekonomi digital tidak hanya terbatas pada sektor teknologi informasi saja, melainkan memengaruhi berbagai sektor seperti retail, jasa keuangan, transportasi, pariwisata, hiburan, dan masih banyak yang lainnya. Ciri-ciri utama dari ekonomi digital adalah intensitas penggunaan Internet yang tinggi, di mana akses dan aktivitas *online* menjadi dasar bagi berbagai transaksi dan kegiatan ekonomi. Hal penting lainnya pada ekonomi digital adalah data menjadi aset berharga yang dimanfaatkan untuk personalisasi layanan, analisis pasar, dan pengembangan bisnis. Dengan teknologi digital memungkinkan proses bisnis berlangsung lebih cepat dan efisien, seperti dalam hal transaksi keuangan dan logistik. Ekonomi digital juga mempunyai jangkauan yang luas di mana bisnis dapat menjangkau konsumen di seluruh dunia melalui *platform online*, melampaui batasan geografis. Pemanfaatan teknologi digital pada Ekonomi digital juga menghasilkan model bisnis baru yang berbeda dengan model bisnis tradisional, seperti *sharing economy* dan *platform on-demand*.

Ekonomi digital Indonesia sedang mengalami pertumbuhan yang pesat menjadi salah satu yang terdepan di Asia Tenggara seperti diperlihatkan pada visualisasi data pada Gambar 14 (Katadata.co.id). Ekonomi digital Indonesia diperkirakan akan terus berkembang ke depannya, tetapi berbagai tantangan perlu diatasi melalui berbagai upaya seperti:

- Meningkatkan pembangunan infrastruktur digital agar Internet dapat diakses secara lebih merata.
- Meningkatkan literasi digital masyarakat agar masyarakat memiliki keterampilan yang dibutuhkan untuk berpartisipasi dalam ekonomi digital.
- Menyempurnakan regulasi agar dapat mendukung inovasi sambil menjaga kepentingan konsumen.
- Meningkatkan keamanan siber untuk menjamin kenyamanan dan kepercayaan dalam beraktivitas secara *online*.

Dengan langkah-langkah yang tepat, ekonomi digital Indonesia diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pertumbuhan ekonomi dan peningkatan kesejahteraan masyarakat.



**Gambar 14.** Potensi ekonomi digital Indonesia (Katadata.co.id).

Masyarakat digital Indonesia yang berdaya merupakan pilar penting dari Visi Indonesia Digital 2045. Masyarakat digital menggambarkan kelompok masyarakat yang terlibat dalam aktivitas berbasis teknologi digital. Dengan 212,9 juta pengguna Internet di Indonesia pada 2023 (Howe, 2023), menandakan basis masyarakat digital yang besar. Angka ini terus meningkat seiring dengan peningkatan penetrasi Internet. Pengguna Internet didominasi oleh pengguna muda [BPS, 2023], khususnya Millennial dan Gen Z, di mana mereka terbiasa mengakses informasi, berbelanja, dan bersosialisasi secara *online*. Masyarakat Indonesia juga terutama yang berada di perkotaan, cepat menerima dan menggunakan teknologi baru, terlihat dari maraknya dan besarnya pengguna media sosial, dan layanan digital lainnya di Indonesia. Namun demikian, masih terjadi kesenjangan digital di Indonesia, di mana akses dan keterampilan digital belum merata di seluruh wilayah Indonesia. Masyarakat di daerah terpencil masih tertinggal dalam hal akses internet dan literasi digital. Dengan penanganan kesenjangan digital melalui upaya seperti meningkatkan infrastruktur dan literasi digital akan memperkecil kesenjangan sehingga masyarakat digital Indonesia dapat berperan aktif dalam mewujudkan Indonesia sebagai negara digital yang maju.

Masyarakat digital Indonesia mengalami pertumbuhan yang pesat. Hal ini merupakan modal yang potensial untuk memajukan ekonomi digital dan meningkatkan kesejahteraan masyarakat. Namun, kesenjangan digital

perlu ditangani melalui berbagai upaya seperti meningkatkan infrastruktur dan literasi digital. Dengan langkah yang tepat akan meningkatkan masyarakat digital yang proaktif dan kompeten yang dapat memacu pertumbuhan ekonomi, membuka peluang kerja, dan mengukuhkan kedudukan bangsa di kancah dunia (Kominfo, 2022).

## 1.6 Posisi Indonesia dalam Lanskap Global

Pasar *mobile broadband* di Indonesia telah mengalami pertumbuhan dan transformasi yang luar biasa, sehingga menempatkan Indonesia sebagai salah satu pemain kunci dalam lanskap global. Indonesia akan menjadi market *smartphone* terbesar ketiga di dunia setelah Cina dan India pada tahun 2025 (GSMA, 2020). Meluasnya penggunaan ponsel pintar dan meningkatnya ketersediaan layanan Internet seluler berkecepatan tinggi telah menempatkan posisi Indonesia yang signifikan dalam lanskap global. Data statistik global di awal tahun 2023, dunia mempunyai total populasi 8,01 miliar dengan koneksi selular 8,46 Miliar (*penetration rate* 64%), dan pengguna Internet 5,16 Miliar (*penetration rate* 64.8%), serta pengguna media sosial 4,76 Miliar (Kemp, 2023). Semetara itu data statistik Indonesia tidak kalah mengesankan, di mana dengan total populasi 276,4 Juta, Indonesia mempunyai koneksi selular 353,8 Juta (*penetration rate* 86,54%), pengguna Internet 212,9 Juta (*penetration Rate* 66,48%), dan pengguna media Sosial 167,0 Juta (BPS, 2023), (Kominfo, 2022) (Howe, 2023).

Pertumbuhan pesat *mobile broadband* di Indonesia disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk inisiatif pemerintah untuk memperluas infrastruktur digital dan meningkatkan akses Internet di seluruh Nusantara. Pengakuan pemerintah terhadap potensi transformatif dari *mobile broadband* dan peran aktifnya dalam pengembangan infrastruktur telekomunikasi di daerah-daerah yang kurang terlayani melalui program USO BAKTI membentuk posisi Indonesia yang signifikan di pasar *mobile broadband* global. Kemunculan *startup* digital lokal juga berperan penting dalam mendorong inovasi dan persaingan di pasar *mobile broadband*, memperkenalkan solusi kreatif untuk mengatasi tantangan unik dari populasi Indonesia yang beragam dan tersebar secara geografis. Untuk melayani cakupan geografis Indonesia yang luas, saat ini sudah berdiri sekitar 600.000 total BTS untuk jaringan

selular dengan mayoritas 85% dari BTS tersebut menggunakan teknologi 4G sementara BTS 5G yang sudah terbangun saat ini masih kurang dari 1%.

Walaupun perkembangan *mobile broadband* di Indonesia sudah cukup baik dalam 5 tahun terakhir ini, tetapi masih banyak kendala yang harus dihadapi. Kinerja dari konektivitas *mobile broadband* suatu negara bisa dilihat dari *Mobile Connectivity Index* (MCI) yang dikeluarkan oleh GSMA (GSMA, 2023a). MCI adalah alat untuk mengukur kinerja dari 170 negara untuk menilai kemajuan suatu negara dalam mencapai akses Internet seluler yang luas dan mendorong inklusi digital. MCI memberikan skor untuk setiap negara dalam rentang 0 hingga 100 untuk empat faktor pendukung utama:

- **Infrastruktur:** Menilai ketersediaan, kualitas, dan keterjangkauan jangkauan jaringan seluler (2G, 3G, 4G, 5G).
- **Keterjangkauan:** Mengevaluasi biaya paket data seluler dan telepon genggam relatif terhadap tingkat pendapatan rata-rata.
- **Kesiapan konsumen:** Menganalisis faktor-faktor seperti literasi digital, akses terhadap perangkat, dan kemauan untuk menggunakan internet seluler.
- **Konten dan layanan:** Memeriksa ketersediaan dan relevansi konten, aplikasi, dan layanan keuangan seluler dalam bahasa lokal.

Menurut GSMA *Connectivity Index*, Indonesia mempunyai score 67,9. Walaupun untuk Indonesia angka di atas sudah cukup besar, tetapi masih ada masalah penyebaran yang belum merata dan kualitas yang belum baik. Walaupun nilai ini lebih tinggi dari rata-rata dunia yang mempunyai skor 61,29, namun diantara negara ASEAN Indonesia ada dalam urutan ke 6 dari 10 negara dari sisi *mobile connectivity index*.

Terkait Transformasi Digital, Komisi Ekonomi dan Sosial PBB untuk Asia dan Pasifik (ESCAP) telah membahas lanskap transformasi digital di Asia dan Pasifik, menyoroti kesenjangan digital yang semakin parah dan kesenjangan pertumbuhan yang semakin lebar. ESCAP melakukan analisis menggunakan kerangka Indeks Transformasi Digital (DTI) untuk memahami status dan kesenjangan transformasi digital di wilayah Asia Pasifik. Kajian tersebut mengusulkan kerangka kerja dan 105 indikator yang tersebar dalam lima pilar utama yaitu, Infrastruktur Jaringan, Pemerintahan, Bisnis, Masyarakat dan Ekosistem untuk mengukur *Digital Transformation Index* (DTI) suatu negara.



## 2 TANTANGAN TELEKOMUNIKASI BERKELANJUTAN

### 2.1 Tuntutan Industri Keberlanjutan

Sejalan dengan kesadaran terhadap perubahan iklim dan dampak lingkungan yang terus meningkat, industri di seluruh dunia dituntut untuk melakukan operasi dalam industrinya secara berkelanjutan, tak terkecuali untuk industri telekomunikasi (NGMN, 2021), (Sasmita dkk., 2014). Keberlanjutan (*sustainability*) dalam industri telekomunikasi mengacu pada praktik pengembangan, penggelaran, dan pengelolaan jaringan dan layanan telekomunikasi dengan cara yang meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan, melestarikan sumber daya, meningkatkan tanggung jawab sosial, dan memastikan kelangsungan ekonomi jangka panjang. Hal ini termasuk mengurangi emisi karbon, meningkatkan efisiensi energi, dan menerapkan praktik ramah lingkungan dalam aktivitas produksi dan pembuangan. Menurut GSMA, sebuah sambungan seluler melepaskan sekitar 59 kilogram (kg) karbon dioksida setiap tahun, lebih jauh GSMA memperkirakan bahwa operator seluler bertanggung jawab atas sekitar 490 juta ton setara karbon dioksida per tahun, atau sekitar 1% dari total emisi karbon pada tahun 2021 (GSMA, 2022).

Industri telekomunikasi selular khususnya telah berupaya untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energinya (5G Americas, 2023). Peningkatan efisiensi energi yang terlihat pada sistem seluler saat ini merupakan hasil dari berbagai usaha mencakup peningkatan dalam transmisi data, kontrol pesan dan sinyal yang lebih efisien, dan kemampuan untuk memanfaatkan *sleep mode* berdasarkan kondisi trafik komunikasi. Selain itu, terjadi pergeseran arsitektur jaringan komunikasi yang berbasis peningkatan disagregasi dengan arsitektur *cloud-native*, virtualisasi, dan fungsionalitas jaringan berbasis perangkat lunak (NFV), yang berdampak pada pengurangan konsumsi sumber daya. Evolusi menuju orkestrasi yang cerdas dan dinamis, kemampuan program, manajemen siklus hidup, dan otomatisasi penuh memberikan harapan yang signifikan untuk mencapai tujuan efisiensi energi. Selain itu, perlu juga pendekatan komprehensif yang mencakup aspek-aspek seperti spesifikasi dan desain terkait arsitektur terdistribusi, pemanfaatan *cloud*, teknologi RAN dan *Edge* yang dapat dikonfigurasi ulang, serta telemetri yang terintegrasi dengan arsitektur

kognitif dan otonom berbasis AI untuk mengelola efisiensi energi (NGMN, 2021).

Secara umum ada tiga aspek kunci dalam *sustainability* industri Telekomunikasi, yaitu aspek lingkungan, sosial dan ekonomi (Alzbeta). Karenanya, industri telekomunikasi juga berupaya menjembatani kesenjangan digital dan memastikan bahwa layanan telekomunikasi dapat diakses, terjangkau, dan aman bagi semua orang, sebagai bagian dari komitmen industri terhadap tanggung jawab sosial. Prinsip-prinsip ESG (*Environmental, Social, and Governance*) semakin relevan dalam industri telekomunikasi, seiring dengan upaya untuk mengurangi jejak karbon secara keseluruhan dan memastikan pertumbuhan infrastruktur digital yang berkelanjutan. ESG adalah kerangka kerja terstruktur untuk mengevaluasi kinerja dan perilaku perusahaan dalam tiga bidang utama: lingkungan hidup, sosial, dan tata kelola. ESG memberikan pendekatan sistematis untuk menilai seberapa baik perusahaan mengelola risiko dan peluang yang terkait dengan faktor-faktor tersebut. ESG sering kali digunakan sebagai alat untuk mengukur keberlanjutan (*sustainability*) dan dampak etis suatu perusahaan, di mana keberlanjutan adalah istilah yang lebih luas yang dapat mencakup ESG sebagai salah satu komponennya, bersama dengan aspek lain seperti kelayakan ekonomi dan tanggung jawab sosial (GSMA, 2022a). Transformasi digital, melalui penggunaan jaringan data dan platform digital, memainkan peran penting dalam memungkinkan perusahaan memantau, mengukur, dan mengoptimalkan upaya ESG, dan mengkomunikasikan inisiatif secara lebih efektif kepada para pemangku kepentingan.

Untuk mencapai keberlanjutan dalam industri telekomunikasi, penting untuk menyelaraskan infrastruktur dengan kebutuhan pengguna. Keselarasan antara infrastruktur dan kebutuhan memastikan bahwa sumber daya tidak terbuang sia-sia, sehingga menghasilkan manfaat ekonomi dan lingkungan. Aspek kunci keberlanjutan dalam industri telekomunikasi adalah efisiensi penggunaan sumber daya, khususnya energi. Dengan menyelaraskan infrastruktur dengan kebutuhan pengguna dan mengoptimalkan kinerja infrastruktur, industri telekomunikasi tidak hanya dapat meningkatkan daya saing ekonominya, tetapi juga mengurangi dampak lingkungannya. Selain itu untuk memenuhi prinsip ESG, perlu juga memastikan pertimbangan etis dan keamanan data dalam industri telekomunikasi. Karenanya, penting untuk memprioritaskan langkah-

langkah privasi dan keamanan data saat menangani data sensitif tentang kemampuan jaringan dan potensi risiko. Untuk menjamin privasi, industri telekomunikasi harus menerapkan langkah-langkah untuk memastikan perlindungan data pribadi terjaga, dan mengizinkan akses untuk berbagai aplikasi berbasis jaringan hanya kepada individu yang berhak.

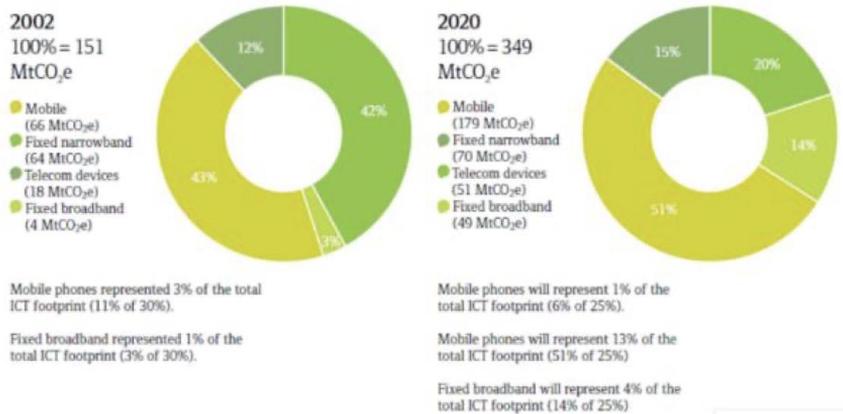
Industri telekomunikasi mempunyai potensi untuk memainkan peran penting dalam mendorong keberlanjutan, baik dalam operasinya sendiri maupun dalam industri lainnya. *Mobile broadband* merupakan pendorong pembangunan berkelanjutan, pertumbuhan ekonomi, dan pengurangan emisi karbon. Sektor TIK hanya menyumbang 1,4% emisi karbon global, tetapi berpotensi mengurangi 15% di sektor lain, seperti energi, industri, dan transportasi (Ericsson, 2020).

Industri telekomunikasi dapat berkolaborasi dengan sektor lain untuk mengembangkan solusi inovatif yang memanfaatkan teknologi telekomunikasi khususnya nirkabel untuk mengurangi emisi karbon dan mendorong keberlanjutan (GSMA, 2022b). Industri seperti pertanian, transportasi, logistik, pendidikan, dan ritel dapat memperoleh manfaat dari kemajuan teknologi komunikasi nirkabel (Hatta dkk., 2021). Misalnya, di bidang pertanian, pertanian presisi (*smart farming*) dapat difasilitasi dengan penggunaan teknologi IoT. Hal ini memungkinkan penggunaan sumber daya seperti air dan pupuk secara lebih efisien, sehingga mengurangi dampak terhadap lingkungan.

## 2.2 Jejak Karbon (*Carbon Foot Print*) Industri Telekomunikasi

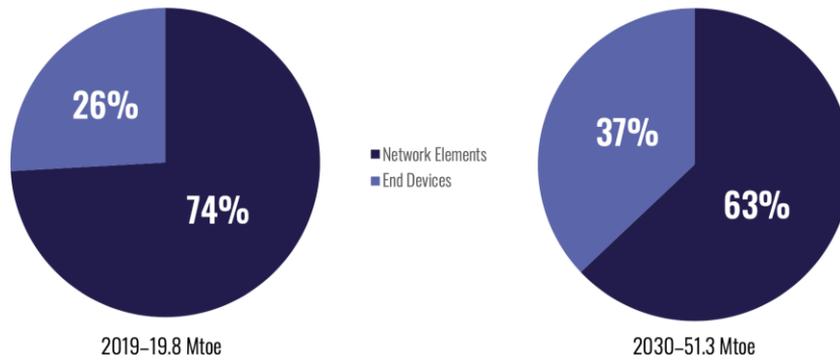
Industri telekomunikasi mengukur emisi karbonnya dengan mengevaluasi emisi gas rumah kaca berdasarkan tiga cakupan, yaitu *Scope 1*: merupakan emisi langsung dari operator seperti emisi dari pengoperasian *base station*, *Scope 2*: emisi tidak langsung seperti emisi akibat penggunaan pendingin ruangan, dan *Scope 3*: emisi yang tidak terkait dengan operator, tetapi merupakan akibat dari penggunaan layanan yang diberikan (Rec.ITU-T, 2020). Untuk *Scope 1* dan 2 konsumsi energi pada industri telekomunikasi secara garis besar berasal dari perangkat (*devices*) dan infrastruktur telekomunikasi atau elemen jaringan (*network elements*). Jejak karbon global perangkat telekomunikasi pada tahun 2002 adalah 18 MtCO<sub>2e</sub>, diperkirakan akan meningkat ~ 3 kali lipat pada tahun 2020 menjadi 51 MtCO<sub>2e</sub>. Demikian

pula dengan jejak karbon infrastruktur telekomunikasi pada tahun 2002 sebesar 133 MtCO<sub>2</sub>e, dan diperkirakan pada tahun 2020 akan meningkat menjadi ~300 MtCO<sub>2</sub>e seperti diperlihatkan pada Gambar 17. (Wessam dkk., 2021).



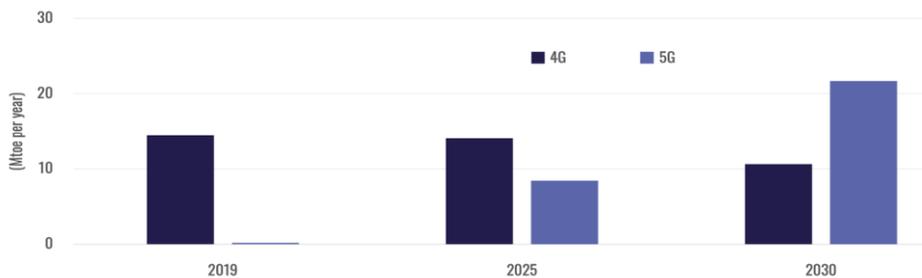
**Gambar 17.** *Global telecoms footprint (devices dan infrastructure)* (Wessam dkk., 2021)

Dari jejak karbon global industri telekomunikasi, kontribusi dari komunikasi bergerak selular cukup signifikan dibandingkan dengan *Fixed Networks* dan *Enterprise Network* (GSMA, 2023b). Hal ini sesuai dengan perkiraan mengingat industri komunikasi selular adalah yang paling dominan di mana saat ini ada 8,46 miliar koneksi selular secara global di seluruh dunia. Untuk melihat lebih jauh kontribusi dari komunikasi selular model konsumsi energi dan jejak karbon telah dikembangkan yang mengelompokkan konsumsi energi dari dua komponen, yaitu elemen jaringan (*network elements*) dan perangkat (*end devices*) (Lian, 2020). Elemen Jaringan utamanya meliputi unit *baseband*, sel (*Base Station*), jaringan inti (*Core Network*), peralatan pasif untuk fungsi pendinginan, pemantauan dan kontrol. Model ini tidak mencakup peralatan jaringan untuk *backhaul* dan *transport*. Sementara perangkat akhir (*end devices*) mencakup perangkat selular pribadi seperti ponsel cerdas dan tablet, serta perangkat IoT yang didukung selular, termasuk yang terhubung ke jaringan LTE Cat1, LTE Cat M1, dan NB-IoT. (Lian, 2020). Setelah memperkirakan konsumsi energi setiap komponen, hasil analisis memperkirakan bahwa keseluruhan jejak energi teknologi selular akan mencapai 19,8 juta ton setara minyak (Mtoe) per tahun pada tahun 2020. Angka ini diperkirakan akan tumbuh menjadi 51,3 Mtoe pada tahun 2030.



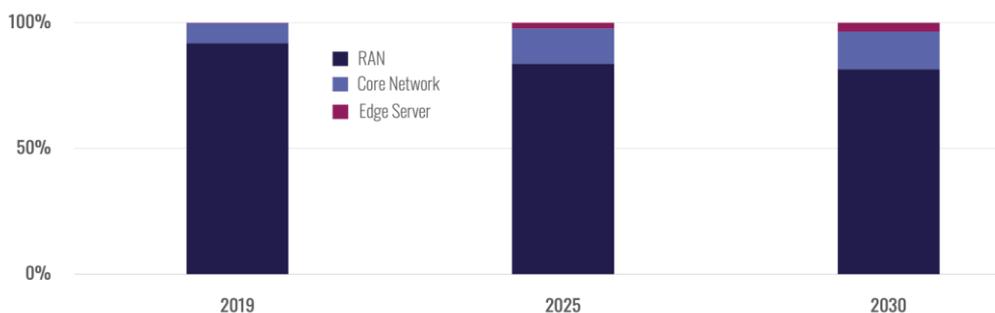
**Gambar 18.** Total Konsumsi Energi dari Elemen Jaringan (*Network Elements*) vs *End Devices* Dunia 2019 ke 2030 (Lian, 2020).

Mengingat saat ini kita memasuki era 5G, *breakdown* lebih jauh total konsumsi energi berdasarkan teknologi 4G dan 5G diperlihatkan pada Gambar 18.



**Gambar 19.** Total Konsumsi Energi Global Jaringan 4G dan 5G Dunia: 2019 ke 2030 (ABI Research).

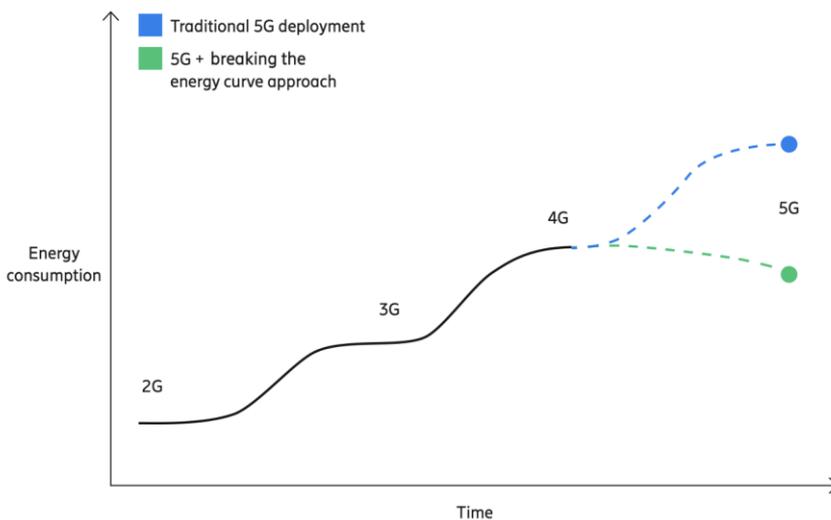
Sementara *breakdown* konsumsi energi berdasarkan jenis *network element* utama jaringan selular diperlihatkan pada Gambar 20.



**Gambar 20.** Rasio Konsumsi Energi dari RAN, Core Networks dan Edge Server dalam Persen Dunia: 2019 ke 2030 (Lian, 2020).

Dari gambar 20 di atas terlihat bahwa RAN (*Radio Access Network*) adalah elemen jaringan yang memerlukan konsumsi energi terbesar, tetapi industri selular selayaknya fokus untuk mengurangi konsumsi energi di semua aspek tidak hanya RAN. Inisiatif program keberlanjutan yang sudah banyak diimplementasikan pada industri telekomunikasi terbukti cukup efektif dalam mengurangi jejak karbon. Walaupun trafik data meningkat sebesar 31% pada tahun 2021, GSMA mengatakan konsumsi energi dan emisi karbon terkait masing-masing hanya meningkat sebesar 5% dan 2% (GSAM, 2023b).

Konsumsi energi jaringan seluler terus meningkat pada setiap generasi baru. Konsumsi energi akan meningkat dua kali lipat jika 5G diterapkan dengan cara yang sama seperti 3G dan 4G untuk memenuhi permintaan lalu lintas yang meningkat. Hal ini tidak berkelanjutan dari sudut pandang biaya atau lingkungan. Namun, berkat standar 5G dan berbagai upaya pengembangan, konsumsi energi dapat dikurangi secara signifikan. 5G, yang merupakan standar paling hemat energi, akan memungkinkan sistem seluler menggunakan mode tidur cerdas (*smart sleep mode*) secara lebih efektif dan memperluas jangkauan dengan menggunakan pita yang lebih rendah sekaligus meningkatkan kapasitas dan kecepatan (Ericsson, 2020).



**Gambar 21.** Penggelaran 5G dengan Konsumsi Energi yang menurun (Ericsson, 2020).

## 2.3 Strategi Industri Berkelanjutan

Industri telekomunikasi menjalankan operasi keberlanjutan dengan menggunakan berbagai strategi. Namun, pada akhirnya, tujuan utamanya adalah mengurangi emisi karbon dan konsumsi energi. Beberapa strategi yang dapat diterapkan oleh perusahaan telekomunikasi untuk mengurangi jejak karbon meliputi (Sasmita dkk., 2014), (WBBA, 2022), (Hatt, 2023), (Buzzi, 2016):

1. Melakukan efisiensi energi, strategi ini dilakukan dengan menerapkan beberapa strategi, seperti optimalisasi konsumsi energi *base station* melalui desain perangkat keras yang efisien dan teknik manajemen daya, serta menggabungkan sumber energi terbarukan dan mendorong praktik hemat energi dalam infrastruktur jaringan. Selain itu, industri telekomunikasi dapat menerapkan teknologi virtualisasi, komputasi awan (*cloud computing*) dan *edge computing* untuk mengkonsolidasikan pusat data sehingga mengurangi konsumsi energi. Dengan virtualisasi jaringan dan beralih ke *cloud computing* dan *edge computing*, operator telekomunikasi dapat mengurangi kebutuhan akan infrastruktur, peralatan fisik dan kemampuan komputasi yang tinggi, sehingga menurunkan konsumsi energi dan jejak karbon. Dalam industri telekomunikasi, operator dapat menghitung efisiensi energi menggunakan beberapa alternatif metrik seperti, energi yang digunakan per bit data; energi yang digunakan untuk satu *base station* atau lokasi sel; energi yang dibutuhkan untuk satu sambungan; dan energi untuk menghasilkan satu unit pendapatan.
2. Memastikan daur ulang dan pembuangan yang bertanggung jawab, di mana pelaku industri Telekomunikasi harus menetapkan program daur ulang dan pembuangan yang tepat untuk perangkat elektronik. Hal ini termasuk mengembangkan kemitraan dengan pihak-pihak yang menangani daur ulang dan menerapkan program pengambilan kembali bagi pelanggan untuk mengembalikan perangkat lama mereka untuk dibuang atau didaur ulang dengan benar.
3. Perencanaan infrastruktur yang tepat dan *scalable*, di mana dalam merencanakan dan membangun infrastruktur jaringan dapat mengakomodasi peningkatan permintaan dan trafik komunikasi sekaligus memastikan konektivitas yang andal dan berkualitas tinggi bagi pengguna. Karenanya penting mempertimbangkan faktor-faktor seperti

cakupan, kapasitas, keandalan, dan skalabilitas dalam merancang jaringan komunikasi seluler yang berkelanjutan untuk menyelaraskan infrastruktur dengan kebutuhan pengguna.

4. Menggunakan bahan dan metode konstruksi berkelanjutan dalam pengembangan kedepan, misalnya untuk evolusi ke generasi 6G, ada tuntutan untuk penggunaan komponen daur ulang atau ramah lingkungan pada *base station* dan peralatan lainnya untuk mengurangi dampak lingkungan dari infrastruktur 6G
5. Mengadopsi teknologi AI (*Artificial Intelligence*) dan ML (*Machine Learning*), seiring dengan semakin matangnya AI dan ML, industri telekomunikasi dapat menerapkan ‘tools’ berbasis AI dan ML yang intinya menyediakan *tools* yang “*energi-aware*” untuk penghematan energi. Beberapa contoh yang sudah dilakukan, misalnya untuk monitoring penggunaan energi dan kinerja jaringan, memberikan KPI tentang kinerja RAN dan degradasi jaringan, *root cause analysis* masalah tingkat lanjut, mengoptimalkan konsumsi daya untuk *base station*, dan menyesuaikan kondisi peralatan terhadap kondisi trafik (Lian, 2020).
6. Privasi dan keamanan data, memastikan langkah-langkah privasi dan keamanan data yang kuat tidak hanya melindungi konsumen namun juga berkontribusi terhadap keberlanjutan dengan mencegah pelanggaran data dan kerusakan lingkungan terkait yang disebabkan oleh penyalahgunaan informasi pribadi.
7. Memprioritaskan strategi memperpanjang umur perangkat (*device longevity*), di mana semua pemangku kepentingan industri telekomunikasi, baik pengguna, operator telekomunikasi dan vendor jaringan dapat meningkatkan manajemen siklus hidup produk, mendukung ekonomi sirkular. Dalam ekonomi sirkular, produk dan perangkat, seperti telepon seluler, *switch* dan *router* lama, diperbarui, digunakan kembali, dan didaur ulang untuk meminimalkan limbah. Pengguna seluler di Indonesia sangat antusias untuk selalu berganti telepon seluler ke model terbaru, padahal memperpanjang masa pakai ponsel satu tahun akan menghemat sekitar 21,4 juta ton emisi karbon setiap tahunnya pada tahun 2030 (Lian, 2020).

Dengan menerapkan strategi ini, industri telekomunikasi dapat secara efektif mengurangi jejak karbon dan berkontribusi terhadap masa depan yang lebih berkelanjutan.

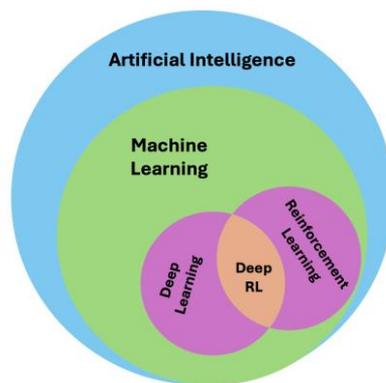
## 3 PERAN PEMBELAJARAN MESIN DALAM MENDUKUNG TELEKOMUNIKASI BERKELANJUTAN

### 3.1 Pembelajaran Mesin

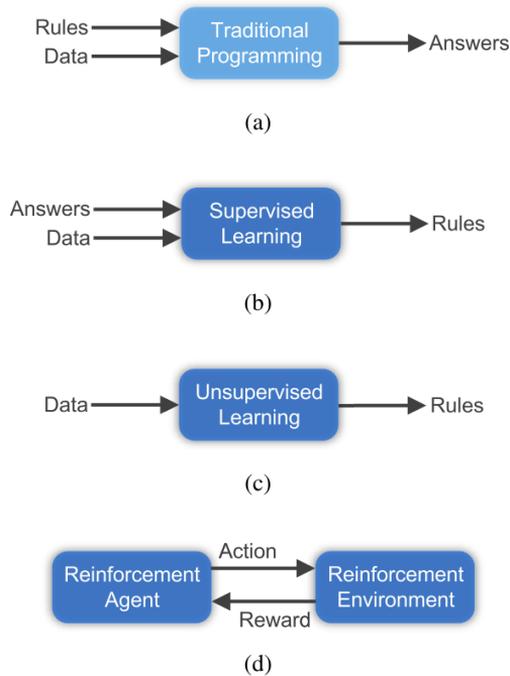
Istilah "*Artificial Intelligence* (AI)" dan "*Machine Learning* (ML)" sering digunakan secara bergantian, tetapi sebenarnya keduanya mewakili konsep yang berbeda. Sementara AI mengacu pada bidang yang lebih luas dalam menciptakan sistem yang dapat meniru kecerdasan manusia untuk melakukan berbagai tugas (McCarthy, 2007). ML atau Pembelajaran Mesin adalah pendekatan khusus dalam AI yang berfokus pada memungkinkan komputer belajar dari data tanpa diprogram secara eksplisit (Mitchell, 1997).

Pada intinya, *Machine Learning* memberdayakan komputer untuk mengenali pola, membuat prediksi, dan meningkatkan kinerja dari waktu ke waktu berdasarkan pengalaman atau data. Pergeseran paradigma dari pemrograman tradisional ke pembelajaran dari data telah merevolusi berbagai industri, mulai dari layanan kesehatan hingga keuangan termasuk telekomunikasi, dengan membuka wawasan dan kemampuan baru.

Membedakan antara AI dan *Machine Learning* sangatlah penting. AI mencakup berbagai teknik dan metode, termasuk *rule-based systems*, *expert systems*, dan *symbolic AI*, di mana aturan dan logika eksplisit mengatur pengambilan keputusan. Sebaliknya, algoritma Pembelajaran Mesin mempelajari pola dan hubungan dari data untuk membuat prediksi atau keputusan, seringkali tanpa campur tangan manusia.



**Gambar 22.** Relasi antara *Artificial Intelligence*, *Machine Learning*, *Deep Learning*, dan *Reinforcement Learning*.



**Gambar 23.** Perbedaan Programming Tradisional dan ML: (a) Programming Tradisional, (b) *Supervise Learning*, (c) *Unsupervised Learning*, (d) *Reinforcement Learning* (Manuel , 2019).

Klasifikasi atau pengelompokan algoritma ML, dari sudut pandang untuk bisa menggambarkan taksonomi algoritma ML secara ringkas dan lengkap diringkaskan sebagai berikut.

### 1. *Supervised Learning*

Dalam *Supervised Learning*, algoritma dilatih pada data berlabel, di mana setiap masukan dikaitkan dengan keluaran atau label yang sesuai. Tujuannya adalah untuk mempelajari pemetaan dari input ke output, sehingga memungkinkan algoritma membuat prediksi pada data yang tidak terlihat. Aplikasi yang umum untuk *Supervised Learning* mencakup klasifikasi, di mana masukan dikategorikan ke dalam kelas-kelas diskrit, dan regresi, di mana keluarannya berupa nilai kontinu. Contoh algoritma pembelajaran yang diawasi termasuk *Support Vector Machines (SVM)*, *Decision Trees*, dan *Neural Networks*.

### 2. *Unsupervised Learning*

*Unsupervised Learning* (pembelajaran tanpa pengawasan) melibatkan pelatihan algoritma pada data tidak berlabel, yang tujuannya adalah

mengungkap pola atau struktur tersembunyi di dalam data. Tidak seperti pada *Supervised Learning*, tidak ada label keluaran yang telah ditentukan sebelumnya, dan algoritma harus mengidentifikasi hubungan atau *cluster* hanya berdasarkan data masukan. Pengelompokan, reduksi dimensi, dan deteksi anomali adalah tugas umum dalam pembelajaran tanpa pengawasan. Contoh algoritma pembelajaran tanpa pengawasan termasuk *K-Means Clustering*, *Principal Component Analysis* (PCA), dan *Autoencoders*.

### 3. *Reinforcement Learning*

*Reinforcement Learning* adalah paradigma di mana agen belajar mengambil keputusan dengan berinteraksi dengan lingkungan dan menerima umpan balik berupa penghargaan atau penalti. Tujuannya adalah untuk mempelajari kebijakan yang memaksimalkan imbalan kumulatif dari waktu ke waktu. Algoritma *Reinforcement Learning* belajar melalui *trial and error*, mengeksplorasi berbagai tindakan dan belajar dari konsekuensinya. Penerapan pembelajaran penguatan meliputi permainan, robotika, dan pengendalian kendaraan otonom. Contoh algoritma pembelajaran penguatan termasuk metode *Q-Learning*, *Deep Q-Networks* (DQN), dan *Policy Gradient*.

### 4. *Artificial Neural Networks*

*Artificial Neural Networks* (ANN) /Jaringan Syaraf Tiruan (JST) adalah model komputasi yang terinspirasi oleh struktur dan fungsi jaringan saraf biologis, seperti otak manusia. JST terdiri dari node yang saling berhubungan, yang disebut neuron, yang disusun dalam beberapa lapisan. ANN adalah konsep dasar dalam bidang pembelajaran mesin dan mendapatkan popularitas karena kemampuannya mempelajari pola dan hubungan kompleks dari data. ANN belajar dari contoh yang diberikan dalam data pelatihan. Proses pelatihan melibatkan penyajian pasangan *input-output* ke jaringan, menghitung prediksi, membandingkannya dengan target sebenarnya, dan menyesuaikan bobot untuk meminimalkan kesalahan prediksi. Kemampuan jaringan untuk menggeneralisasi data yang tidak terlihat dievaluasi menggunakan kumpulan data validasi dan pengujian.

Jaringan Syaraf Tiruan telah berhasil diterapkan pada berbagai tugas, termasuk pengenalan gambar, pemrosesan bahasa alami, pengenalan ucapan, dan prediksi *time series*. Fleksibilitas, skalabilitas, dan kemampuannya untuk mempelajari pola kompleks dari data menjadikannya

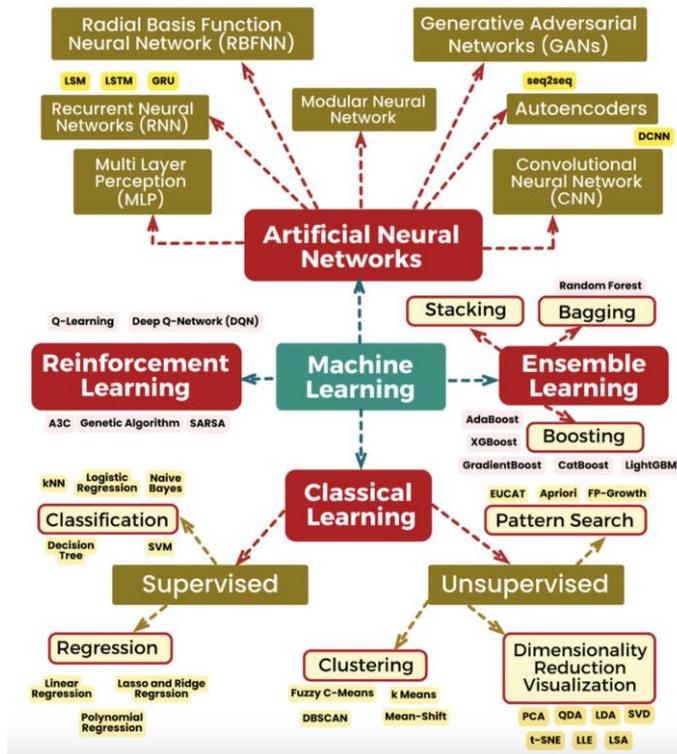
alat yang ampuh di bidang pembelajaran mesin dan kecerdasan buatan. Jaringan Syaraf Tiruan (JST) adalah landasan dasar untuk arsitektur *Deep Learning* yang merupakan subbidang pembelajaran mesin yang berfokus pada penggunaan jaringan saraf dengan banyak lapisan (*layers*) untuk mempelajari representasi data hierarkis. ANN dengan banyak lapisan tersembunyi (*hidden layers*) memungkinkan model pembelajaran mendalam mempelajari pola dan representasi kompleks dari data mentah.

#### 5. *Ensemble Learning*

*Ensemble Learning* adalah teknik pembelajaran mesin yang menggabungkan beberapa model individual, yang dikenal sebagai *base learners* atau *weak learners*, untuk menciptakan model prediktif yang lebih kuat dan tangguh. Ide di balik *Ensemble Learning* adalah untuk memanfaatkan gagasan bahwa sejumlah *learners* yang berbeda-beda dapat mengungguli satu *learner* untuk meningkatkan secara keseluruhan kinerja prediktif, akurasi, dan generalisasi pada tugas yang diberikan. Ada tiga kemungkinan untuk melakukan teknik *Ensemble Learning*, yaitu *Bagging*, *Boosting*, dan *Stacking*. Teknik pertama *Bagging* membuat beragam model dengan melatihnya pada sub-kumpulan data yang berbeda dengan penggantian (*with replacement*) dari data asli. Sementara teknik *ensemble* yang kedua, *Boosting* berfokus pada pembuatan model sekuensial di mana setiap model baru belajar dari kesalahan model sebelumnya, sehingga menghasilkan ansambel yang lebih halus. *Base learners* dalam *Boosting* bisa sama atau sedikit berbeda. Terakhir teknik *ensemble Stacking* umumnya menggunakan kumpulan *base learners* yang lebih beragam, berupa algoritma pembelajaran mesin yang berbeda sama sekali, dibandingkan dengan *Bagging* dan *Boosting*.

Taksonomi dari sejumlah algoritma ML yang populer dapat dilihat pada Gambar 24.

# Machine Learning Algorithms



Gambar 24. Taksonomi algoritma ML (The Ravit Show @ravitjain).

## 3.2 Pembelajaran Mesin dalam Telekomunikasi

Seiring dengan terus berkembangnya industri telekomunikasi, integrasi kecerdasan buatan dan teknologi pembelajaran mesin menjadi semakin penting. Kemajuan ini tidak hanya mengoptimalkan operasi jaringan dan meningkatkan keamanan, tetapi juga meningkatkan pengalaman pelanggan secara signifikan. Dalam konteks telekomunikasi, pembelajaran mesin, bagian dari kecerdasan buatan, berfokus pada pengembangan algoritma dan model yang memungkinkan sistem komputer belajar secara otomatis dari data dan membuat prediksi atau keputusan tanpa pemrograman eksplisit. Algoritma ini diterapkan untuk menganalisis data jaringan dan mengidentifikasi pola atau anomali yang mungkin memengaruhi kinerja jaringan. Teknologi ini memiliki potensi besar untuk mengoptimalkan operasi dan meningkatkan keamanan dan kinerja jaringan secara keseluruhan. Terlebih saat beralih dari 5G ke jaringan masa depan, termasuk

6G, Kecerdasan Buatan (AI) dan Pembelajaran Mesin (ML) akan memainkan peran penting dalam mencapai jaringan yang lebih cerdas, efisien, dan pada akhirnya menuju pada *zero-touch-network* (Crawshaw, 2022).

*Zero-touch-network* adalah jaringan yang beroperasi secara mandiri menggunakan proses otomatisasi, kecerdasan buatan (AI), dan pembelajaran mesin (ML), yang merupakan otomatisasi dan orkestrasi berbasis data (*data driven*) secara *closed-loop*. Sistem ini dirancang untuk mengelola dirinya sendiri dengan intervensi manusia yang minimal, memprediksi potensi permasalahan, mengatasinya, dan mengatasi permasalahan yang terjadi. Dalam konteks telekomunikasi, jaringan *zero-touch* sangat relevan untuk 5G dan jaringan ke depan selanjutnya, karena konsep ini memungkinkan pengelolaan jaringan yang semakin kompleks secara lebih efisien dan efektif.

Dengan kemajuan pesat dalam AI dan pembelajaran mesin, perkembangan ini akan merevolusi jaringan seluler dan komunikasi di masa depan. Mulai dari peningkatan efisiensi jaringan dan alokasi spektrum (Fan dkk, 2018), (Zhang dkk, 2016) hingga mitigasi ancaman keamanan (Ferhat dkk, 2022), potensi penerapan AI dan pembelajaran mesin di berbagai bidang telekomunikasi sangat besar (Yaohua dkk, 2019). Berikut beberapa kemungkinan potensi kasus penggunaan, antara lain:

Pengoptimalan jaringan: Algoritma AI/ML dapat menganalisis pola trafik jaringan, memprediksi permintaan, dan mengoptimalkan sumber daya jaringan seperti alokasi *bandwidth* dan perutean (*routing*) secara *real-time* (Saleem dkk., 2017), (Syed dkk, 2016). Dengan menganalisis data dalam jumlah besar secara *real-time*, algoritma AI/ML dapat mengidentifikasi kongesti jaringan (Huiling dkk, 2021), mengoptimalkan perutean trafik, dan mengalokasikan sumber daya secara dinamis (Lim dkk, 2021). Hal ini dapat menghasilkan peningkatan kinerja jaringan, pengurangan latensi, peningkatan efisiensi jaringan, kualitas layanan yang lebih baik, dan peningkatan pengalaman pengguna. Pengoptimalan jaringan juga bisa dilakukan dari sisi penggunaan spektrum. Algoritma AI/ML dapat melakukan manajemen spektrum (Fan dkk, 2018), (Zhang dkk, 2016), yaitu dengan mengalokasikan frekuensi secara dinamis berdasarkan permintaan dan tingkat interferensi. Hal ini dapat meningkatkan efisiensi spektral dan meningkatkan kinerja jaringan secara keseluruhan.

Perencanaan jaringan dan perencanaan kapasitas (Yandong dkk, 2023), (Fatima dkk, 2020): Algoritma pembelajaran mesin dapat menganalisis data geografis, demografi pengguna, dan pola penggunaan historis untuk memprediksi permintaan di masa depan guna mengoptimalkan perencanaan dan penerapan infrastruktur jaringan, memastikan cakupan dan kapasitas yang optimal. Dengan menganalisis data historis untuk memprediksi kebutuhan kapasitas di masa depan, memungkinkan operator untuk secara proaktif meningkatkan infrastrukturnya guna memenuhi permintaan yang terus meningkat dan menghindari gangguan layanan.

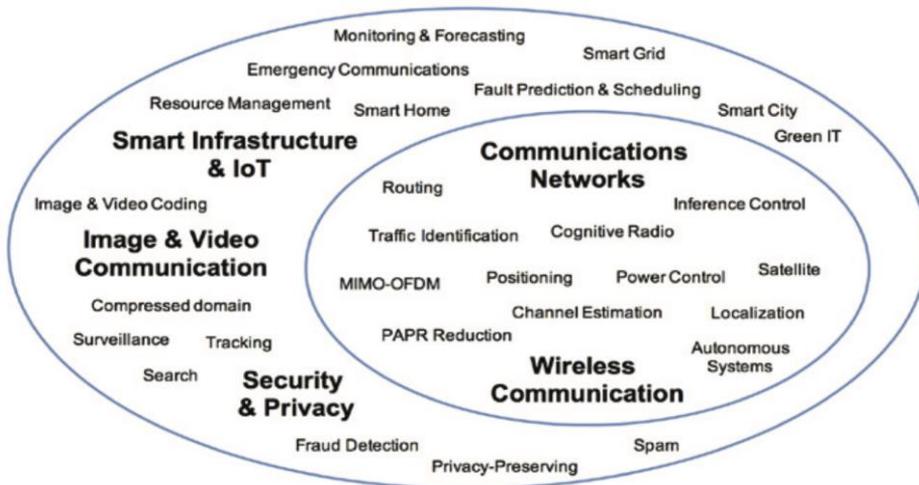
Pemeliharaan dan pemantauan jaringan (Song dkk, 2021): AI dan pembelajaran mesin juga dapat dimanfaatkan dalam pemeliharaan dan pemantauan jaringan. Dengan menganalisis data *real-time* dari perangkat jaringan, algoritma AI/ML dapat mendeteksi anomali dan mengidentifikasi potensi masalah jaringan. Pendekatan proaktif terhadap pemeliharaan jaringan ini dapat membantu mengidentifikasi dan menyelesaikan masalah sebelum masalah tersebut memengaruhi kinerja jaringan atau pengalaman pelanggan. Pendekatan ini juga dikenal sebagai pemeliharaan prediktif di mana jadwal pemeliharaan dapat dialokasikan sebelum masalah muncul untuk menghindari gangguan layanan.

Efisiensi energi (Tulsi dkk, 2023), (Hossain dkk, 2022): AI dan pembelajaran mesin dapat mengoptimalkan konsumsi energi dalam infrastruktur jaringan komunikasi melalui berbagai metode, antara lain Manajemen Daya Cerdas di mana Algoritma AI/ML dapat mengoptimalkan strategi manajemen daya untuk peralatan jaringan, seperti menyesuaikan tingkat daya secara dinamis berdasarkan beban kerja (trafik) atau menerapkan fitur hemat energi selama periode permintaan rendah. Selanjutnya, AI/ML dapat memfasilitasi penerapan teknik jaringan ramah lingkungan seperti virtualisasi jaringan, yang mengkonsolidasikan sumber daya jaringan untuk mengurangi konsumsi energi secara keseluruhan, atau aktivasi mode tidur (*sleep mode*) untuk komponen jaringan yang tidak aktif. Algoritma AI/ML dapat membantu dalam merancang protokol dan arsitektur jaringan secara *energy-aware*, dengan mempertimbangkan faktor-faktor konsumsi energi dalam algoritmanya.

Meningkatkan Pengalaman Pengguna (Stige dkk, 2023): AI/ML dapat menganalisis perilaku dan preferensi pengguna untuk merekomendasikan

paket data, konten, dan fitur jaringan yang dipersonalisasi, sehingga menciptakan pengalaman pengguna yang lebih disesuaikan. AI/ML bisa berperan dalam Manajemen kualitas layanan (QoS) dengan memprioritaskan sumber daya jaringan untuk aplikasi yang memerlukan bandwidth tinggi atau latensi rendah (misalnya, realitas virtual, kendaraan otonom) untuk menjamin kelancaran operasi.

Peningkatan keamanan: AI/ML dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan memitigasi ancaman keamanan seperti serangan DDoS, upaya intrusi, dan infeksi *malware* secara *real-time* dengan menganalisis pola dan perilaku trafik jaringan. ML juga dapat digunakan untuk deteksi anomali, yang terus memantau aktivitas jaringan untuk mencari pola mencurigakan dan potensi serangan siber, sehingga memungkinkan mitigasi ancaman lebih cepat dan efektif.



Gambar 25. Aplikasi ML pada berbagai Area Telekomunikasi (Wojciech, 2018).

### 3.3 Integrasi AI/ML ke dalam Sistem Telekomunikasi

Integrasi algoritma AI/ML ke dalam jaringan komunikasi dapat dipetakan ke Model Referensi OSI. Model referensi *Open Systems Interconnection* (OSI), yang dikembangkan oleh Organisasi Internasional untuk Standardisasi (ISO), adalah kerangka konseptual untuk memahami komunikasi jaringan. Model Referensi OSI tidak mendefinisikan teknologi tertentu namun menyediakan bahasa umum tentang bagaimana sistem yang berbeda berkomunikasi melalui jaringan. Model Referensi OSI berfungsi sebagai pedoman untuk

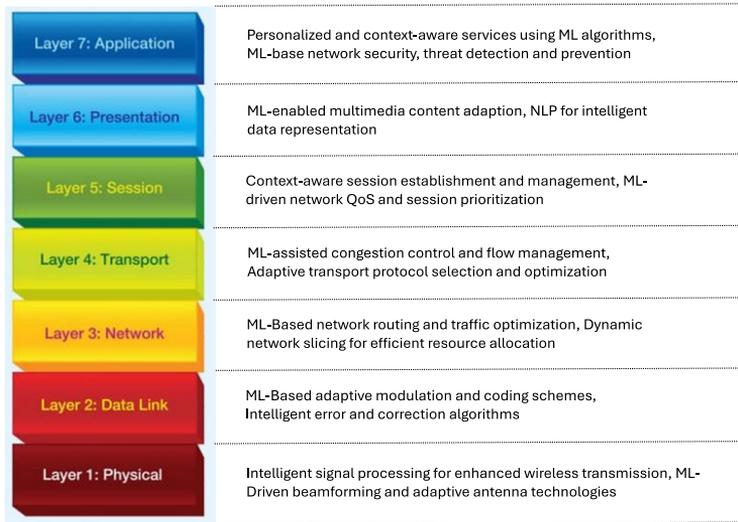
merancang dan memahami arsitektur protokol dan sistem jaringan. Konsep ini mendefinisikan model hierarki yang terdiri dari tujuh lapisan, masing-masing mewakili fungsi tertentu atau serangkaian fungsi yang diperlukan untuk komunikasi antarperangkat jaringan. Ketujuh lapisan tersebut adalah lapisan fisik, lapisan *data link*, lapisan jaringan, lapisan transport, lapisan sesi, lapisan presentasi, dan lapisan aplikasi (Day dkk., 1983). Lapisan fisik berhubungan dengan aspek fisik dari data yang bergerak, seperti spesifikasi listrik, koneksi fisik, dan alamat fisik. Lapisan *data link* memastikan transmisi data yang andal dan menangani aspek fisik pemindahan data. Lapisan jaringan berhubungan dengan perutean dan penerusan data antar jaringan yang berbeda. Lapisan transport memastikan transmisi data yang andal antar sistem akhir. Lapisan sesi mengelola sesi antar aplikasi dan menyediakan saluran komunikasi berorientasi koneksi. Lapisan presentasi bertanggung jawab untuk representasi data dan terjemahan antara format yang berbeda. Lapisan Aplikasi menyediakan platform bagi aplikasi untuk berinteraksi dengan jaringan.

Algoritma AI/ML dapat diintegrasikan ke dalam semua lapisan ini untuk meningkatkan kinerja, keamanan, dan efisiensi jaringan. Misalnya, algoritma AI/ML dapat digunakan di lapisan fisik untuk mengoptimalkan kekuatan sinyal dan mengurangi interferensi. Pada lapisan *data link*, algoritma AI/ML dapat digunakan untuk deteksi dan koreksi kesalahan. Pada lapisan jaringan, algoritma AI/ML dapat digunakan untuk optimasi *routing* dan pengendalian kemacetan jaringan (*network congestion*). Pada lapisan *transport*, algoritma AI/ML dapat digunakan untuk pengendalian kemacetan dan pengendalian aliran (*congestion and flow control*). Pada lapisan sesi, algoritma AI/ML dapat digunakan untuk manajemen dan keamanan sesi. Pada lapisan presentasi, algoritma AI/ML dapat digunakan untuk kompresi dan enkripsi data. Pada lapisan aplikasi, algoritma AI/ML dapat digunakan untuk optimalisasi layanan jaringan dan peningkatan pengalaman pengguna.

Ilustrasi pemetaan potensi berbagai algoritma ML kedalam model OSI diperlihatkan pada Gambar 26.

Integrasi algoritme AI/ML ke dalam jaringan komunikasi memerlukan pertimbangan cermat terhadap tantangan dan peluang yang terkait dengan penerapannya. Tantangan-tantangan ini mencakup pengumpulan dan pemodelan data dalam jaringan, fitur-fitur yang perlu diberdayakan oleh

AI/ML, dan berbagai *enabler* teknologi untuk pengembangan jaringan kedepan seperti teknologi *cloud computing*, *edge computing*, SDN/NVF, dan NS. Untuk mengatasi tantangan ini, organisasi standar perlu berkolaborasi dan mengembangkan standar baru yang memungkinkan integrasi algoritma AI/ML ke dalam jaringan komunikasi dengan cara yang aman dan efisien.



**Gambar 26.** Pemetaan Penerapan AI/ML pada Model Ref OSI (Adaptasi dari Kumar, 2023)

Integrasi Kecerdasan Buatan dan Pembelajaran Mesin ke dalam jaringan komunikasi seluler masa depan telah menjadi titik fokus bagi badan standardisasi seperti ITU-T, (ITU-T, 2019), ETSI [ETSI, 2020], dan 3GPP (Xingqin, 2023). Organisasi-organisasi ini telah terlibat secara aktif dalam menentukan kerangka kerja dan standar yang membuka jalan bagi integrasi teknologi AI dan ML dalam ekosistem komunikasi seluler.

Integrasi AI dan pembelajaran mesin ke dalam jaringan komunikasi seluler masa depan sangat penting untuk memberikan layanan aplikasi menggunakan beragam kemampuan infrastruktur ICT, seperti *cloud computing*, *edge computing*, SDN/NVF, NS dan berbagai *enabler* teknologi jaringan masa depan. Integrasi ini rumit karena keragaman layanan aplikasi dan infrastruktur TIK, dan diperlukan konfigurasi otomatis atau otonom serta pengoperasian pemetaan antara layanan aplikasi dan kemampuan infrastruktur TIK.

ITU-T, sektor standardisasi dari *International Telecommunication Union*, telah memainkan peran penting dalam mengembangkan standar untuk

integrasi AI dan ML dalam jaringan komunikasi seluler. Salah satu bidang fokus utamanya adalah menentukan persyaratan dan kemampuan algoritma AI dan ML yang dapat meningkatkan kinerja, efisiensi, dan kecerdasan jaringan komunikasi seluler di masa depan. Hal ini mencakup penanganan aspek-aspek seperti manajemen jaringan, alokasi sumber daya, pemeliharaan prediktif, dan pengambilan keputusan yang cerdas. ITU-T telah mengeluarkan Rekomendasi ITU-T Y.3178 menyediakan kerangka fungsional untuk penyediaan layanan jaringan berdasarkan kecerdasan buatan (AI) di jaringan masa depan, termasuk IMT-2020. Rekomendasi tersebut mencakup model berbasis peran bisnis untuk penyediaan layanan jaringan berbasis AI, persyaratan tingkat tinggi untuk peran dan interaksinya dari perspektif operasional berbasis AI, serta komponen fungsional dan interaksinya untuk operasi berbasis AI untuk penyediaan layanan jaringan.

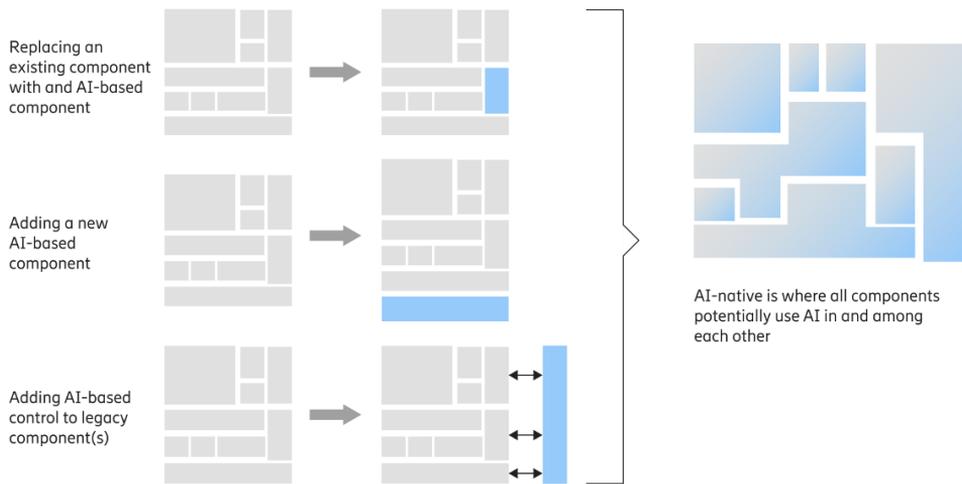
Secara paralel, *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) telah secara aktif mendorong standarisasi aplikasi AI dan ML dalam konteks jaringan komunikasi seluler. Upaya 3GPP berfokus pada pendefinisian peningkatan arsitektur dan kemampuan jaringan untuk mendukung penerapan fungsi berbasis AI dan ML. Hal ini mencakup pertimbangan untuk mengintegrasikan AI/ML pada *edge network*, memanfaatkan analisis data *real-time*, dan memungkinkan adaptasi dinamis berdasarkan wawasan berbasis AI. Aktivitas standarisasi, seperti fungsi analisis data jaringan (*Network Data Analytics Function* /NWDAF) 3GPP dan arsitektur O-RAN Alliance untuk kontrol cerdas RAN (RIC), mendorong penggabungan teknik AI dan ML dalam jaringan komunikasi.

Demikian pula, Institut Standar Telekomunikasi Eropa (*European Telecommunications Standards Institute*) telah berada di garis depan dalam mengembangkan kerangka kerja untuk mengintegrasikan AI dan ML ke dalam lanskap komunikasi seluler di masa depan. Pekerjaan ETSI dalam domain ini mencakup standarisasi antarmuka, protokol, dan model data yang memfasilitasi interaksi antara komponen AI/ML dan elemen jaringan tradisional. Selain itu, ETSI telah terlibat dalam menentukan mekanisme untuk memastikan keamanan, privasi, dan penggunaan etis AI dan ML dalam jaringan komunikasi seluler.

Kerja kolaboratif ITU-T, ETSI, dan 3GPP telah menghasilkan pengembangan kerangka kerja komprehensif untuk mengintegrasikan AI dan

ML ke dalam jaringan komunikasi seluler masa depan. Dengan menyelaraskan upaya mereka, badan standardisasi ini telah berkontribusi pada pembentukan metodologi umum, protokol, dan praktik terbaik untuk memanfaatkan potensi AI dan ML dalam meningkatkan kinerja, efisiensi, dan kecerdasan jaringan komunikasi seluler. Upaya-upaya ini telah menghasilkan munculnya jaringan *AI-native* dan *zero-touch-network* (Chafika, 2020), (Wen Wu, 2022), di mana algoritma cerdas dan teknik pembelajaran mesin diintegrasikan secara mulus ke dalam manajemen dan operasi jaringan, memungkinkan otomatisasi, optimalisasi, dan pengambilan keputusan yang proaktif secara *closed-loop*.

Mengintegrasikan AI dan *Machine Learning* (ML) secara efektif ke dalam jaringan komunikasi masa depan (*Beyond 5G*) menghadirkan beberapa tantangan yang mendorong perlunya pendekatan baru. Saat ini muncul konsep *AI-Native* (Ericsson, 2023), di mana pengembangan jaringan dari awal telah mempertimbangkan untuk mengintegrasikan model AI dan ML di mana infrastruktur jaringan harus terbuka dan dapat diprogram (*open and programmable*) untuk memungkinkan integrasi algoritma dan model AI secara lancar. Fleksibilitas ini memfasilitasi pembelajaran berkelanjutan dan peningkatan jaringan. Selanjutnya juga diperlukan prosesor yang kuat, saluran data yang efisien, dan antarmuka standar untuk komponen AI. Selanjutnya pada paradigma baru akan lebih *Data-Centric Approach*, yaitu memprioritaskan pengumpulan, penyimpanan, dan pengelolaan data jaringan secara efektif, karena data menjadi ‘bahan bakar’ utama bagi algoritma ML, yang memungkinkan algoritma mempelajari dan mengoptimalkan kinerja jaringan. Selanjutnya juga menerapkan *Cloud-Native* dan Pembelajaran Terdistribusi, di mana pemrosesan AI/ML dapat didistribusikan ke seluruh jaringan, memanfaatkan sumber daya *cloud* dan komputasi *edge* untuk pemrosesan yang efisien dan pengambilan keputusan yang lebih dekat dengan sumber data. Dan hal penting lainnya dalam paradigma baru adalah langkah-langkah keamanan sudah ada sejak awal untuk melindungi data jaringan sensitif yang digunakan oleh model AI/ML. Selain itu, keputusan AI dirancang agar transparan dan dapat dipahami untuk pengawasan dan pemecahan masalah oleh manusia. Ilustrasi Langkah penambahan AI/ML ke dalam sistem jaringan menuju AI Native diperlihatkan pada Gambar 27.



Gambar 27. AI-Native (Ericsson, 2023)

### 3.4 Penelitian Terkait yang Dilakukan

Beberapa topik penelitian yang sudah dan sedang dilakukan penulis terkait penggunaan *Machine Learning* pada bidang telekomunikasi diringkaskan dalam Tabel 1. Intinya semua penelitian tersebut tujuannya adalah untuk mendapatkan algoritma atau protokol untuk peningkatan efisiensi jaringan, algoritma yang hemat energi (*energy-aware*), optimasi sumber daya dan mitigasi ancaman keamanan menuju infrastruktur telekomunikasi yang berkelanjutan.

Tabel 1 Penelitian Terkait Penggunaan ML yang sudah dan sedang dilakukan.

No	TOPIK	AGORITMA ML
1.	Energy-Aware MAC Protocol WSN/HAPS	Adaptive k-Means
2.	Adaptive Successive Interference Cancellation using in PD-NOMA	Deep Learning
3.	Admission Control in Network Slicing 5G	Simulation-Assisted Machine Learning
4.	Handover in Mobile Communication	MLP-NN, LSTM-NN
5.	Intelligent Power Allocation Dalam Sistem Multiuser Massive MIMO	Reinforcement Learning
6.	Edge Computing Video Surveillance	Federated Learning
7.	PD-NOMA User Clustering	Unsupervised Learning
8.	5G Coverage Prediction	Supervised dan Ensemble Stacking
9.	Bandwidth Allocator For Video Analytics Applications	Profiling and ML-based object detection
10.	Spektrum Sensing pada Ko-Eksistensi Wi-Fi 6E/7 dan 5G NR-U	Supervised Learning
11.	Telecommunication Throughput/ Traffic prediction	Supervised Learning,
12.	Prediksi Mobilitas	Graph-Based ML
13.	eKYC SPBE - Access Control SPBE	Ensemble Stacking Deep Learning

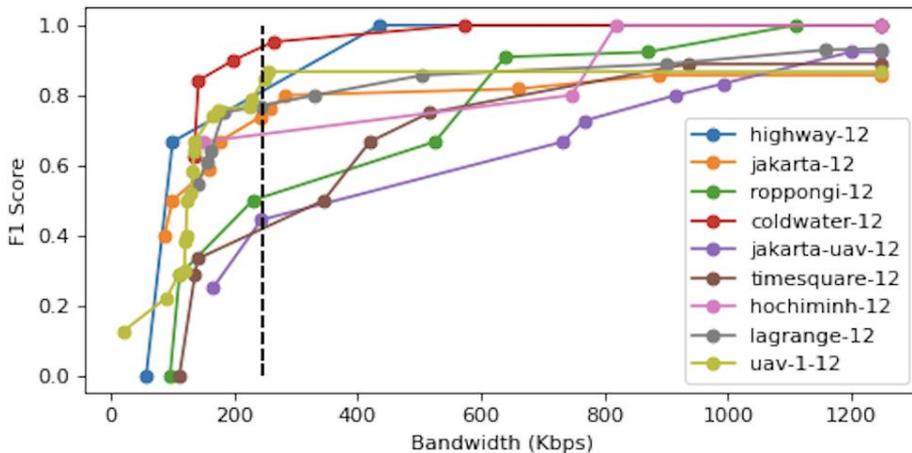
No	TOPIK	AGORITMA ML
14	eKYC SPBE - Liveness Detection & Face Spoofing	ActivenessNet Model (Deep learning based)
15	eKYC SPBE – Gender Classification	CNN-based
16	Malware Detection	Image-based SSL
17	Pasif and Active Liveness Detection SPBE	ActivenessNet Model (Deep learning based)

Seberapa baik kinerja dari pemanfaatan ML dapat dievaluasi dari melihat capaian metrik performansi yang dicapai. Secara tradisional, kinerja jaringan komunikasi bergantung pada metrik seperti *throughput*, *delay*, *packet loss* dan *jitter*. Namun, dengan diperkenalkannya pembelajaran mesin (ML) dalam jaringan komunikasi, muncul metrik baru yang relevan dengan kinerja ML.

Sebagai contoh untuk topik penelitian *Bandwidth Allocator For Video Analytics Applications* pada tabel diatas digunakan metrik *F1-score*. Penelitian ini berkaitan dengan pengaturan pengalokasian *bandwidth* pada media transmisi yang digunakan bersama oleh sejumlah sumber kamera yang akan mengirimkan video ke server pemroses pada suatu aplikasi *video analytic*. Mengingat *bandwidth* yang tersedia adalah terbatas, saat sejumlah sumber kamera mengirimkan lebih dari satu video ke server, diperlukan skema alokasi *bandwidth* yang memastikan video-video tersebut dapat diterima dengan kualitas yang optimal dengan penggunaan sumberdaya *bandwidth* yang efisien.

Dalam skenario penelitian ini, proses pada *server* melibatkan deteksi objek menggunakan algoritma *machine learning*, di mana ada *trade off* antara akurasi atau sensitivitas hasil deteksi objek dengan kualitas video yang diterima. Sementara kualitas video yang baik ditentukan oleh pemilihan parameter kompresi dari *encoder* video dan ketersediaan *bandwidth*. Makin besar *bandwidth* yang disediakan makin baik kualitas video yang bisa diterima di server. Dengan mengatur alokasi *bandwidth* berdasarkan akurasi dan sensitivitas, maka penggunaan *bandwidth* dapat dioptimalkan.

Gambar 28 memperlihatkan bagaimana besarnya *bit rate* yang digunakan memengaruhi metrik deteksi objek dalam bentuk *F1-score*. Dengan kata lain dengan memasukkan algoritma ML maka perlu evaluasi metrik yang sesuai diluar metrik kinerja tradisional dalam jaringan telekomunikasi seperti *throughput*, *delay*, *packet loss* dan lainnya.



**Gambar 28.** *F1-Score* Deteksi Objek dipengaruhi *Bit Rate*.

Metrik kinerja pada sistem ML adalah ukuran kuantitatif yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja model pembelajaran mesin. Metrik ini memberikan wawasan tentang seberapa baik kinerja suatu model dan membantu membandingkan model yang berbeda untuk mengidentifikasi model yang paling sesuai untuk tugas tertentu. Pilihan metrik performa bergantung pada apakah ML digunakan untuk menangani tugas klasifikasi atau tugas regresi. Beberapa metrik performa yang umum digunakan dalam pembelajaran mesin untuk tugas klasifikasi mencakup *accuracy*, *precision*, *recall*, *F1 score*, dan *confusion matrix*. *Accuracy* adalah metrik yang mengukur kebenaran model secara keseluruhan dengan menghitung rasio prediksi yang benar terhadap jumlah total prediksi yang dibuat. *Precision* adalah metrik yang berfokus pada proporsi prediksi positif sebenarnya dari semua prediksi positif, sehingga memberikan indikasi seberapa akurat prediksi model. Di sisi lain, *recall* mengukur proporsi prediksi positif yang sebenarnya dari semua kejadian positif aktual, sehingga memberikan indikasi seberapa baik model mampu mengidentifikasi semua kejadian yang relevan. *F1-score* adalah kombinasi *precision* dan *recall*, yang memberikan ukuran performa model yang seimbang. *Confusion matrix* adalah tabel yang merangkum kinerja model klasifikasi dengan menunjukkan jumlah positif benar, negatif benar, positif palsu, dan negatif palsu. Hal ini berguna untuk memahami kesalahan tertentu (misalnya, positif palsu, negatif palsu).

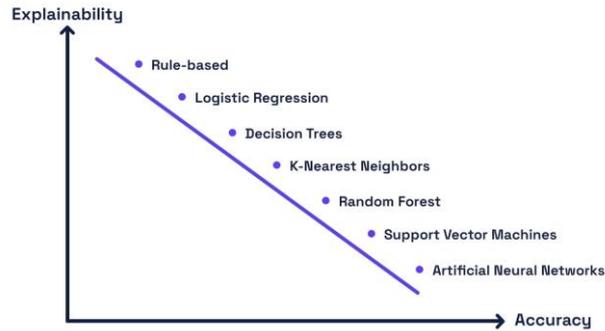
Di sisi lain, Beberapa metrik kinerja yang umum digunakan dalam pembelajaran mesin untuk tugas regresi antara lain *Mean Squared Error* (MSE),

*Root Mean Squared Error (RMSE)*, *Mean Absolute Error (MAE)* dan *R-Squared ( $R^2$ )*. MSE adalah selisih kuadrat rata-rata antara nilai prediksi dan nilai aktual. Ini memberikan hukuman yang lebih berat pada kesalahan yang lebih besar. RMSE adalah akar kuadrat dari MSE, menempatkan kesalahan dalam satuan yang sama dengan data asli. MAE adalah rata-rata selisih mutlak antara nilai prediksi dan nilai aktual. MAE kurang sensitif terhadap *outlier* dibandingkan MSE. *R-Squared ( $R^2$ )* merepresentasikan proporsi varians pada variabel target yang dijelaskan oleh model. Nilainya berkisar antara 0 hingga 1, dan semakin tinggi nilainya berarti semakin sesuai hasil regresi yang didapat.

Selain metrik diatas, pada kasus penggunaan ML pada sistem atau jaringan telekomunikasi perlu mempertimbangkan hal lain seperti aspek *Fairness*. *Fairness* penting terutama dalam skenario di mana sumber daya dialokasikan secara dinamis berdasarkan model ML. Aspek *fairness* menilai apakah pengguna atau aplikasi yang berbeda diperlakukan sama dalam alokasi *bandwidth*, latensi yang dialami oleh kelompok pengguna yang berbeda, atau *fairness* dalam Kualitas Layanan (QoS).

Selain itu juga penting mengetahui aspek *explainability*, karena model ML bisa jadi rumit, *explainability/interpretability* mengukur seberapa baik kita memahami keputusan yang dibuat oleh model tersebut. Hal ini penting bagi operator jaringan untuk mendiagnosis masalah dan memastikan model berfungsi sebagaimana mestinya. Aspek *explainability* berfokus pada penilaian transparansi dan interpretasi keputusan model. Metrik ini bertujuan untuk mengukur sejauh mana perilaku model dapat dipahami dan dipikirkan oleh operator manusia. Beberapa metrik *explainability* yang umum mencakup, seberapa pentingnya fitur, kompleksitas model, interpretabilitas global, Interpretabilitas lokal, dan konsistensi.

Hal lain yang juga penting dipertimbangkan adalah efisiensi sumber daya. Saat algoritme ML berjalan pada sumber daya jaringan, metrik seperti waktu pelatihan, penggunaan memori, dan konsumsi daya komputasi menjadi penting. Metrik ini membantu menilai efisiensi sistem ML dalam memanfaatkan sumber daya jaringan. Aspek lain yang tak kalah penting adalah Keamanan dan Privasi. Dengan model ML yang menangani data sensitif di jaringan, metrik yang terkait dengan kerentanan keamanan dan pelanggaran privasi data menjadi penting. Metrik ini membantu menilai ketahanan sistem ML terhadap potensi serangan.



Gambar 29. Tingkat *explainability* berbagai algoritma Supervised ML (Kleyton, [holisticai.com](http://holisticai.com)).

## 3.5 Prediksi Trafik dan *Throughput* Berdasarkan Data KPI

### 3.5.1 Prediksi Trafik dan *Throughput*

Berikut ini dibahas salah satu contoh dari penggunaan *machine learning* untuk prediksi trafik dan *throughput* pada suatu BTS komunikasi selular berdasarkan data monitoring KPI yang dilakukan penulis.

Dalam jaringan telekomunikasi secara umum, *Throughput* mengacu pada jumlah data yang dapat ditransfer melalui jaringan dalam jangka waktu tertentu. *Throughput* biasanya diukur dalam bit per detik (bps), kilobit per detik (kbps), atau megabit per detik (Mbps). *Throughput* adalah metrik penting dalam menilai kinerja dan efisiensi jaringan selular, karena berdampak langsung pada pengalaman pengguna dalam hal kecepatan unduh dan unggah, penelusuran web, *streaming*, dan aktivitas intensif data lainnya.

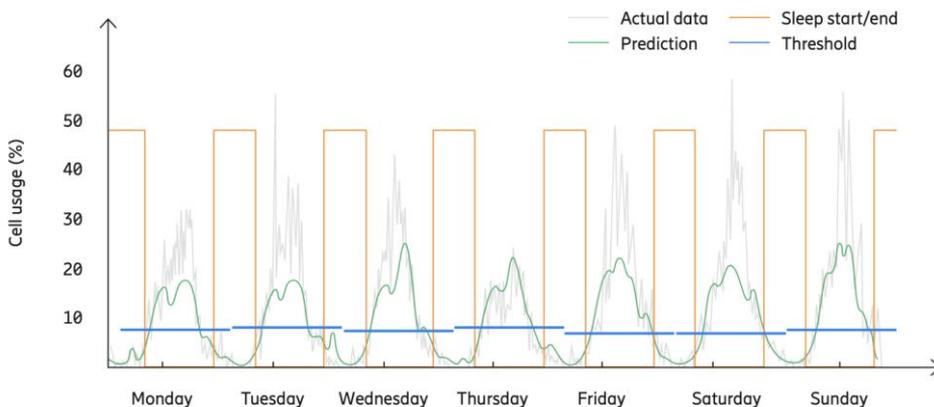
Di sisi lain, trafik komunikasi mengacu pada volume data yang dikirimkan melalui jaringan dalam jangka waktu tertentu. Trafik komunikasi mencakup berbagai jenis aktivitas komunikasi, termasuk panggilan suara, pesan teks, *browsing* internet, *download* file, *streaming* video, dan transfer data lainnya. Trafik komunikasi dapat diukur berdasarkan jumlah pengguna, durasi sesi, jumlah data yang dipertukarkan, atau *bandwidth* yang dikonsumsi.

Secara keseluruhan, memprediksi *throughput* di masa depan sangat penting untuk memastikan kelancaran operasional, skalabilitas, dan daya saing jaringan selular dalam memenuhi kebutuhan pengguna yang terus berkembang dan mendukung aplikasi dan layanan yang sedang berkembang. Sementara, memprediksi trafik komunikasi di masa depan sangat penting

untuk memastikan skalabilitas, optimasi penggunaan sumberdaya, keandalan, dan keberlanjutan jaringan seluler dalam memenuhi permintaan layanan data yang terus meningkat dan mendukung perkembangan perangkat, aplikasi, dan pengalaman digital yang terhubung di dunia yang semakin berpusat pada seluler saat ini.

*MIMO Augmented Sleep Mode (MSM)* dan *Cell Sleep Mode (CSM)* (Ericsson, 2020) adalah dua contoh pemanfaatan prediksi trafik untuk efisiensi konsumsi energi. Untuk MSM dalam sel dengan MIMO 4x4, algoritme ML menganalisis trafik komunikasi secara terus-menerus. Selanjutnya akan memprediksi kapan harus menggunakan keempat antena radio atau hanya satu untuk melakukan transmisi, dan kapan harus mengubahnya kembali. Sementara pada CSM, *overlaid capacity cells* dapat mendeteksi kondisi lalu lintas rendah dan mematikannya sendiri untuk menghemat energi.

ML dapat memprediksi pola trafik dan menyesuaikan berapa banyak daya yang digunakan berdasarkan prediksi tersebut. Hal ini dapat menghemat energi tanpa mengorbankan pengalaman pengguna. Dalam uji coba, pendekatan ini mengurangi konsumsi energi sebesar 14% dengan tetap mempertahankan kinerja (Ericsson, 2020).



**Gambar 30.** Prediksi Trafik Telekomunikasi menggunakan ML untuk *Augmented MIMO Sleep Mode* (Ericsson, 2020).

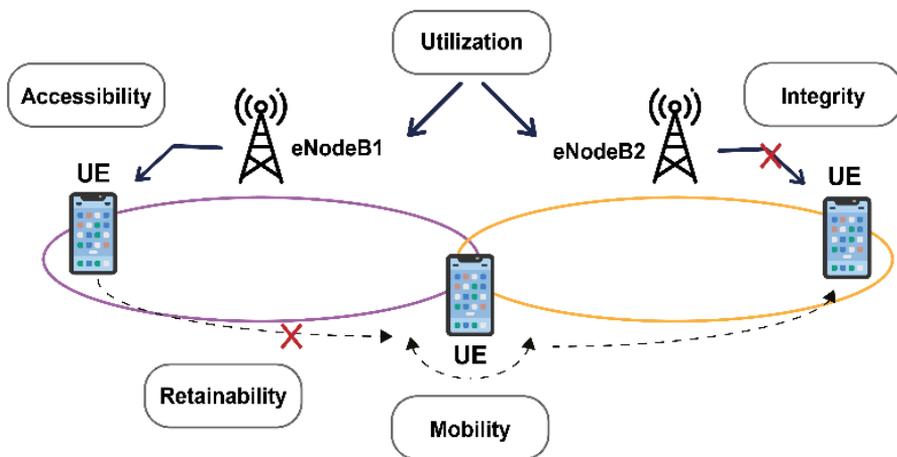
### 3.5.2 Prediksi Trafik dan *Throughput* dengan Data KPI

Sebagian besar model prediksi trafik komunikasi dan *throughput* saat ini mengandalkan data historis, sementara penggunaan KPI (indikator kinerja

utama) jaringan lainnya untuk tujuan ini masih terbatas. KPI adalah *Key Performance Indicator* atau Indikator Kinerja Utama, di mana dalam konteks komunikasi seluler merupakan metrik khusus yang digunakan untuk menilai kinerja, efisiensi, dan kualitas jaringan atau sistem. Metrik ini memberikan wawasan tentang berbagai aspek pengoperasian jaringan dan pengalaman pengguna, membantu operator memantau, mengelola, dan mengoptimalkan jaringan mereka secara efektif. Indikator KPI penting untuk mengukur kinerja jaringan dan mendeteksi serta menyelesaikan masalah kinerja. Pemantauan KPI sangat penting untuk memastikan efisiensi dan optimalisasi jaringan, dengan tujuan memaksimalkan kinerja sekaligus meminimalkan penggunaan sumber daya.

Menurut 3GPP, ada enam kategori utama KPI yang memengaruhi kinerja jaringan: Aksesibilitas, Retainabilitas, Availabilitas/Ketersediaan, Integritas, Mobilitas, dan Utilisasi. KPI Aksesibilitas memastikan pengguna dapat terhubung ke jaringan dan melakukan panggilan atau menggunakan data. KPI Aksesibilitas mencakup antara lain *Call Setup Success Rate* yaitu persentase usaha panggilan sukses terhubung, dan *Packet Delivery Ratio*, yaitu persentase paket data terkirim sukses. KPI Retainabilitas mengukur seberapa baik jaringan menjaga pengguna yang terhubung agar tidak mengalami *drop* untuk panggilan atau sesi data yang dibangun. KPI *Retainability* meliputi antara lain *Call Drop Rate*, yaitu persentase panggilan yang terputus sebelum sesi selesai dan *Handover Success Rate*, yaitu Persentase keberhasilan *handover* (peralihan antar-sel) selama panggilan atau sesi data. KPI Availabilitas mengukur persentase waktu selama sel jaringan tidak tersedia. KPI ini digunakan untuk mendeteksi fitur kinerja yang tidak dapat diterima dan memastikan bahwa jaringan memenuhi persyaratan yang ditentukan. Integritas KPI memastikan transmisi data bebas dari kesalahan. KPI Integritas antara lain mencakup *Bit Error Rate* (BER) yaitu Persentase bit data yang diterima dengan kesalahan. KPI Mobilitas terkait dengan *handover* (HO) dan mengukur tingkat keberhasilan *handover* intra-frekuensi, antar-frekuensi, dan inter-RAT (*Radio Access Technology*). KPI ini membantu mengevaluasi kemampuan jaringan untuk mempertahankan layanan berkelanjutan bagi pengguna seluler. KPI *Utilization* mengukur pemanfaatan sumber daya radio, seperti saluran fisik dan daya transmisi. Hal ini membantu operator mengoptimalkan alokasi sumber daya, menghindari kongesti, dan memastikan penggunaan kapasitas

yang tersedia secara efisien. Ilustrasi berbagai kategori KPI pada jaringan mobile selular diperlihatkan pada Gambar 31.



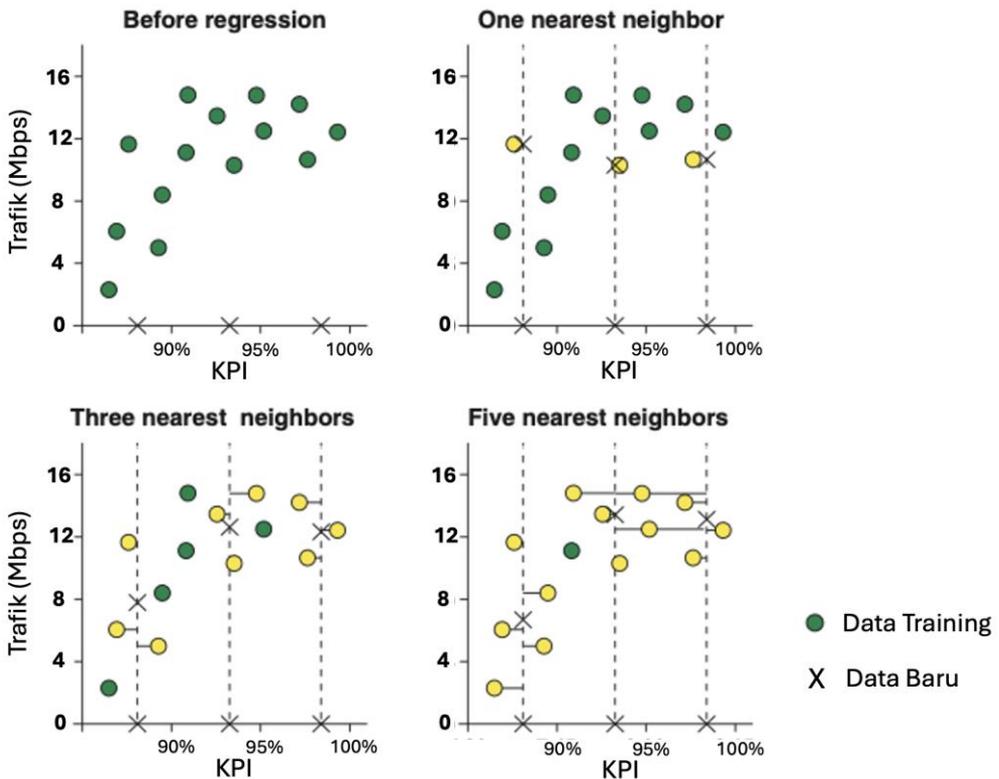
Gambar 31. Berbagai kategori KPI pada Jaringan Komunikasi Selular (Madalena, 2022).

Sebagian besar model perkiraan *throughput* dan trafik komunikasi didasarkan pada analisa data historis, sedangkan pemanfaatan KPI jaringan lain (indikator kinerja utama) untuk perkiraan *throughput* dan trafik komunikasi masih terbatas. Dalam tulisan ini diperlihatkan pemanfaatan algoritma ML untuk prediksi *throughput* dan trafik komunikasi pada suatu BTS berdasarkan data KPI real yang dimonitor jam-an (*hourly*) selama satu bulan dari suatu BTS di kota Bandung. Dalam model ini digunakan 14 KPI yang terkait dengan KPI Aksesibilitas, Retainabilitas, Availabilitas, Integritas, Mobilitas, dan Utilisasi. Model regresi prediksi ML yang digunakan adalah tiga jenis model ML berbeda, yaitu *K-Nearest Neighbors* (KNN), *Random Forest*, dan *XGBoost*.

### 3.5.2.1 Model Prediksi Trafik dan *Throughput* dengan kNN

*K-Nearest Neighbors* (KNN) adalah algoritma pembelajaran mesin serbaguna yang bisa digunakan untuk tugas klasifikasi atau regresi. Dalam regresi, kNN memprediksi nilai kontinu untuk sampel data baru berdasarkan nilai tetangga terdekatnya dalam data pelatihan. Dalam fase pelatihan, algoritma KNN menyimpan seluruh data pelatihan untuk referensi, yaitu kumpulan data dengan fitur (variabel independen yaitu KPI dalam contoh disini) dan variabel target (apa yang ingin diprediksi, yaitu *throughput* atau trafik dalam

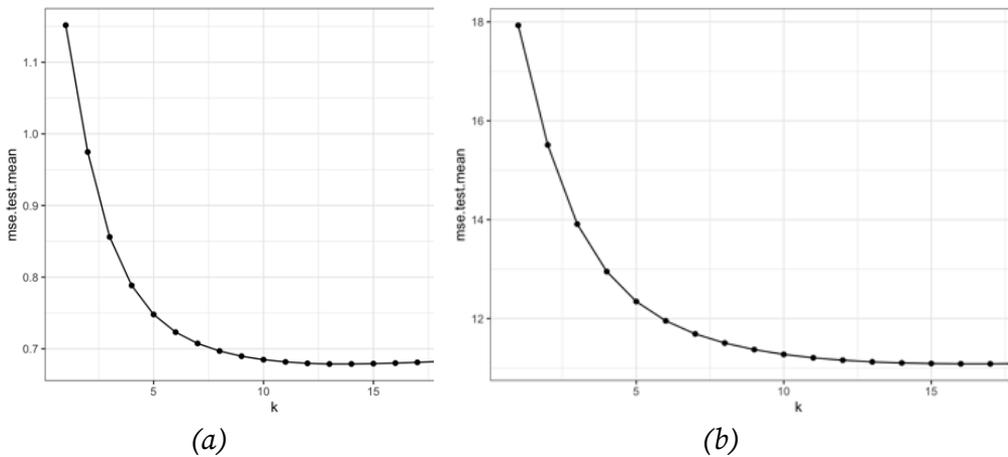
contoh ini). Saat melakukan prediksi untuk sampel data baru dengan nilai target yang tidak diketahui, KNN menghitung jarak antara titik ini dan semua titik dalam data pelatihan menggunakan metrik jarak seperti jarak *Euclidean*. Kemudian algoritma kNN memilih K titik data terdekat (tetangga) ke titik baru berdasarkan jarak ini. KNN memprediksi nilai target untuk titik data baru dengan merata-ratakan nilai target K tetangga terdekatnya. Dengan merata-ratakan nilai tetangga terdekat, KNN memprediksi nilai target titik data baru yang mencerminkan kemiripannya dengan data di sekitarnya. Proses ini diilustrasikan pada Gambar 32.



**Gambar 32.** Algoritma kNN untuk Regresi (Adaptasi dari Rhys 2020).

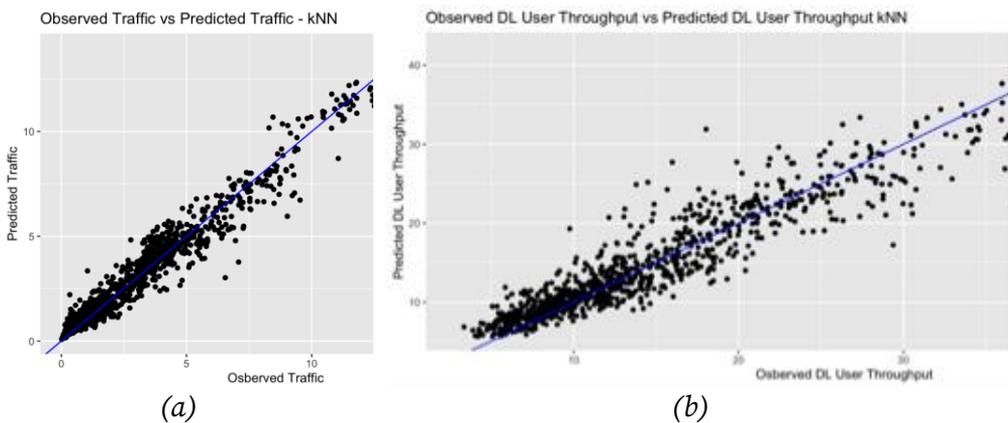
Nilai K (jumlah tetangga) berdampak signifikan terhadap performa model. K yang kecil mungkin menyebabkan *overfitting* (terlalu fokus pada tetangga dekat yang mungkin tidak mewakili secara umum), sedangkan K yang besar dapat menyebabkan *underfitting* (tidak menangkap pola lokal). Untuk mendapatkan nilai K yang tepat untuk mendapatkan model kNN dengan performa terbaik dilakukan proses *hyperparameter optimization*. Tuning nilai

K ini dilakukan dengan eksperimen dengan menentukan ruang pencarian *hyperparameter* dengan prosedur pencarian *grid* (mencoba setiap nilai dalam ruang pencarian) dengan menggunakan strategi *10-fold cross-validation*. Gambar 32 memperlihatkan *ploting* dari proses *hyperparameter tuning*, di mana nilai K optimal adalah 13 dengan MSE = 0.6787804 untuk prediksi Trafik dan nilai K = 17 dengan MSE = 11.0837368 untuk prediksi *Throughput*.



**Gambar 33.** *Ploting* dari proses *hyperparameter tuning* untuk Prediksi (a) Trafik (b) *Throughput Downlink*

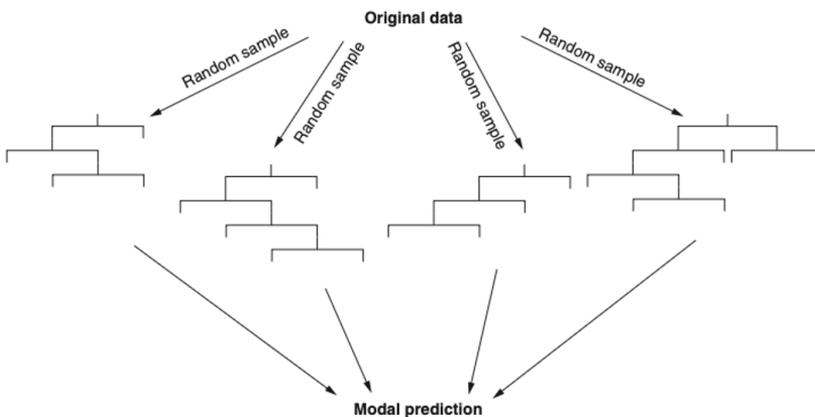
Visualisasi dalam bentuk hubungan antara nilai *actual* vs *predicted* untuk prediksi Trafik dan *Throughput* dengan KNN diperlihatkan pada Gambar 34.



**Gambar 34.** *Ploting* *Ploting* Nilai *actual* trafik vs *predicted* dengan kNN untuk prediksi (a) Trafik; (b) *Throughput Downlink*.

### 3.5.2.2 Model Prediksi Trafik dan *Throughput* dengan *Random Forest*

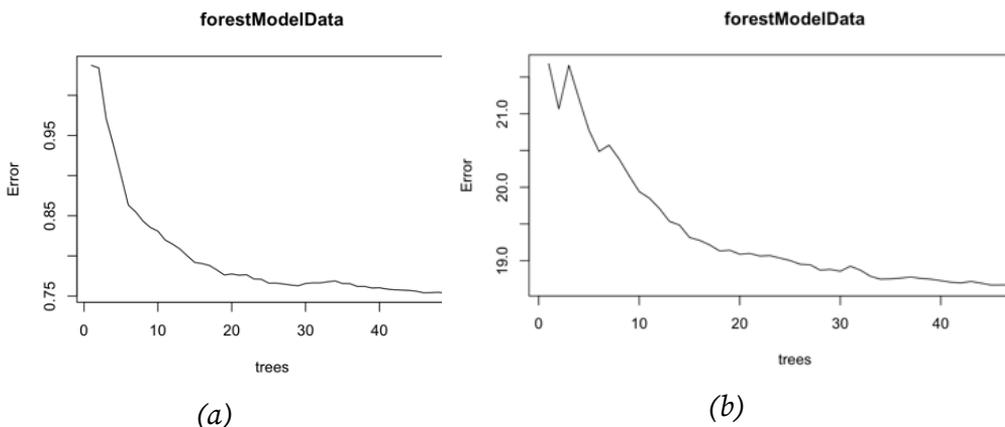
Algoritma *Random Forest* (RF) adalah algoritma pembelajaran mesin *supervised* yang banyak digunakan untuk tugas klasifikasi dan regresi. RF didasarkan pada konsep pembelajaran ansambel, yang melibatkan penggabungan prediksi beberapa model untuk meningkatkan kinerja secara keseluruhan. Algoritma ini sangat berguna untuk menangani *noisy dataset* dan mengurangi varians. Algoritma dimulai dengan memilih subset data pelatihan secara acak (*with replacement*), untuk membuat set data baru. Proses ini dikenal sebagai agregasi *bootstrap* atau *bagging*, seperti diperlihatkan pada Gambar 34. Untuk setiap subset acak, *decision tree* dibangun. *Decision tree* adalah jenis model yang membuat prediksi dengan membagi data secara rekursif menjadi subkumpulan yang lebih kecil berdasarkan nilai fitur masukan. Untuk mengurangi korelasi antar *decision tree*, subset fitur acak dipilih untuk setiap tree, di mana proses ini disebut *feature bagging*. Setelah semua *decision tree* dilatih, algoritma memprediksi nilai regresi untuk masukan baru dengan membuat rata-rata prediksi semua *decision tree*. Hal ini dilakukan untuk mengurangi varians dan meningkatkan akurasi prediksi. Algoritma *Random Forest* memiliki beberapa keunggulan, seperti kemampuannya menangani tugas regresi dan klasifikasi, ketahanannya terhadap *outlier* dan *noise*. Namun, algoritma ini mungkin mahal secara komputasi dan mungkin memerlukan lebih banyak sumber daya dibandingkan dengan algoritma lainnya. Ini juga kurang intuitif ketika berhadapan dengan *decision tree* dalam jumlah besar.



Gambar 35. Bootstrap aggregating (*bagging*) dengan *decision trees* (Rhys, 2020).

*Random Forest* memiliki beberapa *hyperparameter* yang dapat disesuaikan untuk mengoptimalkan kinerja, seperti jumlah *tree*, *maximum depth* dari *trees*, sampel minimum *per leaf* dan fitur maksimum yang perlu dipertimbangkan pada setiap pemisahan (*split*). Dalam kasus contoh untuk prediksi trafik dan *throughput* dilakukan tuning dari *hyperparameters RF* mencakup jumlah *tree* individu yang akan dilatih (*ntree*), jumlah variabel prediktor yang diambil sampelnya secara acak untuk setiap individual *tree* (*mtry*), jumlah kasus minimum yang diperbolehkan dalam sebuah *node leaf* (*nodesize*) dan menentukan jumlah maksimum *node* di setiap individual *tree* (*maxnodes*). Selanjutnya ditentukan ruang pencarian *hyperparameter* dan mendefinisikan setiap *hyperparameter* sebagai bilangan integer dengan batas bawah dan atas yang masuk akal. Selanjutnya dilakukan *random search* dengan 100 iterasi dan strategi *holdout cross-validation*. Hasil dari tuning *hyperparameter* untuk prediksi trafik didapat, *ntree* = 50; *mtry* = 11; *nodesize* = 7; *maxnodes* = 30; *MSE* = 0,75. Dengan cara yang sama hasil dari tuning *hyperparameter* untuk prediksi *throughput downlink* didapat, *ntree* = 50; *mtry* = 11; *nodesize* = 9; *maxnodes* = 29; *MSE* = 18,45.

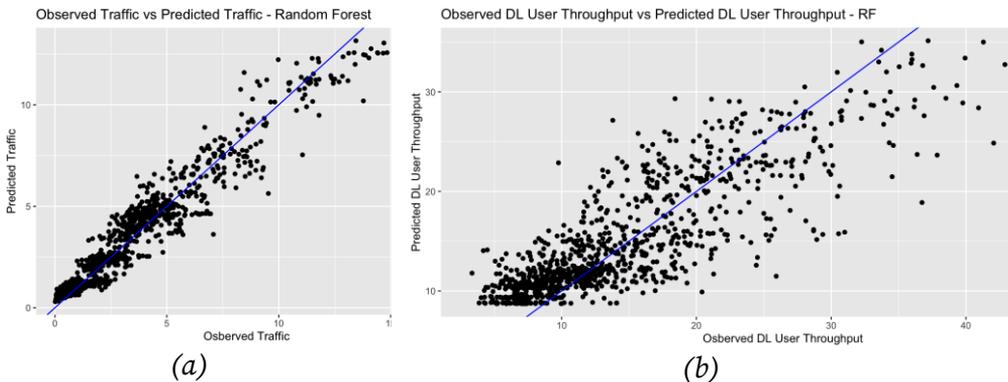
Untuk menilai kinerja prediksi *Random Forests* dan untuk memilih nilai yang sesuai untuk parameter penyetalan digunakan teknik estimasi kesalahan yang digunakan dalam algoritma pembelajaran ansambel, yaitu *Out-Of-Bag* (OOB) error. OOB ini dihitung dengan menggunakan observasi yang tidak termasuk dalam sampel *bootstrap* atau subsampel dari data original untuk setiap *tree*. Observasi ini disebut sebagai observasi *out-of-bag* (OOB).



**Gambar 36.** *Plotting out-of-bag error* untuk model RF untuk prediksi (a) Trafik; (b) *Throughput Downlink*

Plotting dari *error out-of-bag* diperlihatkan pada Gambar 36, di mana sumbu y-axis menunjukkan error kuadrat rata-rata untuk semua kasus, yang diprediksi oleh *tree* yang tidak menyertakan kasus tersebut dalam set pelatihan. Grafik menunjukkan variasi jumlah *tree* pada ensemble nilai grafik yang menuju garis mendatar menunjukkan jumlah individu *tree* yang mencukupi dalam RF.

Dengan menggunakan nilai hasil *tuning hyperparameter* RF yang sudah dipilih, plotting dari aktual vs prediksi Trafik dan *Throughput* secara visual dapat dilihat pada Gambar 37.



Gambar 37. Plotting nilai *actual* vs *predicted* dengan RF untuk prediksi (a) Trafik dan (b) *Throughput* Downlink

### 3.5.2.3 Model Prediksi Trafik dan *Throughput* dengan *XGBoost*

*XGBoost* (*Extreme Gradient Boosting*) adalah teknik pembelajaran mesin tangguh yang cocok untuk tugas regresi. *XGBoost* memperluas konsep *gradient boosting* dengan menggunakan beberapa model (umumnya *decision tree*) untuk membentuk ansambel yang lebih kuat. Prosesnya dimulai dengan model dasar, sering kali berupa *shallow decision tree*, yang memberikan prediksi awal untuk variabel target dalam data pelatihan. Selanjutnya, eror (penyimpangan antara nilai prediksi dan nilai aktual) dihitung untuk setiap titik data dan digunakan sebagai "*gradien*" yang menunjukkan perbaikan yang diperlukan dalam prediksi. *Decision tree* baru kemudian dibangun untuk mengatasi kesalahan ini secara lebih efektif—dengan fokus intensif pada titik data yang menjadi kendala model sebelumnya. Dengan menambahkan prediksi dari *decision tree* baru ini ke prediksi model awal secara berurutan, ansambel yang semakin akurat akan terbentuk. Proses berulang ini melibatkan pembangunan *decision tree* baru secara terus-menerus yang berkonsentrasi

pada perbaikan kesalahan sebelumnya dan menggabungkannya ke dalam basis pengetahuan kolektif ansambel. Melalui langkah-langkah berulang ini, XGBoost secara bertahap meningkatkan kinerja prediktif secara keseluruhan. Untuk mencegah *overfitting*, XGBoost mengintegrasikan teknik regularisasi selama konstruksi *tree* untuk mendorong generalisasi upaya dengan menghukum *tree* yang terlalu rumit dan mendorong pengenalan pola yang fleksibel berdasarkan fitur kumpulan data.

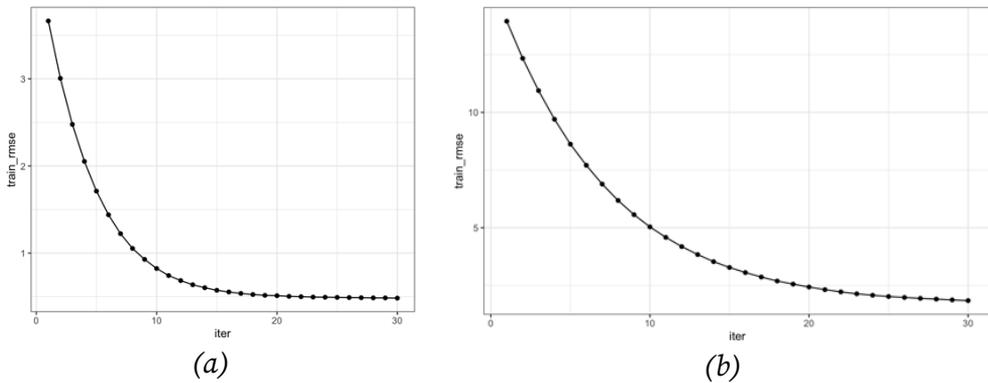
XGBoost, seperti model pembelajaran mesin yang lain, memiliki beberapa *hyperparameter* yang dapat disesuaikan (*tuned*) untuk mengoptimalkan kinerja untuk tugas regresi. *Hyperparameter* utama yang dapat disesuaikan (*tuned*) di XGBoost berhubungan dengan *Tree-Specific Hyperparameters*, *Learning Task-Specific Hyperparameters*, dan *Regularization Hyperparameters*. Dalam penelitian ini, *hyperparameter* berikut di-*tuned* untuk mengoptimalkan performa model XGBoost:

- *eta* dikenal sebagai kecepatan pembelajaran, mempunyai nilai antara 0 dan 1, yang dikalikan dengan bobot model setiap *tree* untuk memperlambat proses pembelajaran guna mencegah *overfitting*.
- *gamma* adalah jumlah minimum pemisahan (*splitting*) di mana *node* harus meningkatkan *loss function* (MSE dalam kasus regresi).
- *max\_depth* adalah jumlah maksimum tingkat kedalaman yang dapat ditumbuhkan oleh setiap *tree*.
- *min\_child\_weight* adalah tingkat *impurity* minimum yang diperlukan dalam sebuah *node* sebelum mencoba untuk memisahkan.
- *subsampel* adalah proporsi kasus yang akan diambil sampelnya secara acak (*without replacement*) untuk setiap *tree*.
- *colsample\_bytree* adalah proporsi variabel prediktor yang diambil sampelnya untuk setiap *tree*.
- *nrounds* adalah jumlah *tree* yang dibangun secara berurutan dalam model.

Pengoptimalan *hyperparameter* dilakukan dengan terlebih dahulu menentukan jenis serta batas atas dan bawah dari masing-masing *hyperparameter* yang akan dicari. Setelah ruang pencarian ditentukan, proses tuning dilakukan dan memberikan hasil sebagai berikut untuk prediksi trafik: *eta* = 0.191; *gamma* = 3.74; *max\_depth* = 11; *min\_child\_weight* = 6.07; *subsample* = 0.92; *colsample\_bytree* = 0.902; *nrounds* = 30, dan *mse.test.mean* = 0.4624310.

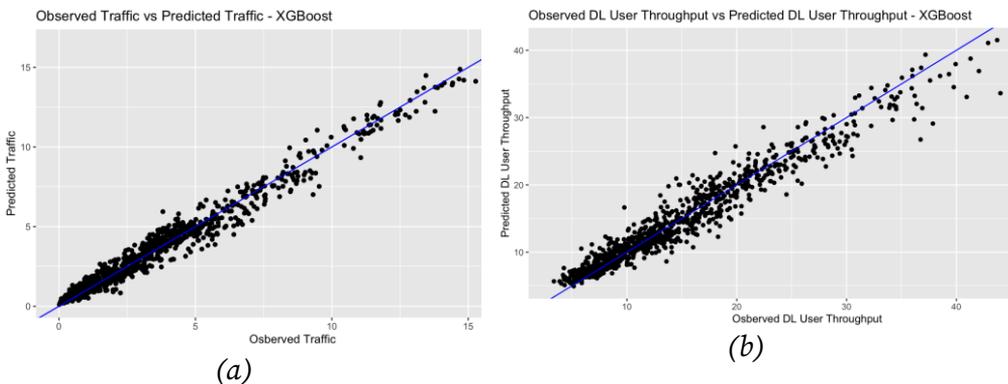
Dengan cara yang sama *hyperparameter optimization* dilakukan untuk prediksi *throughput downlink*, dan didapat hasil berikut:  $\eta = 0.126$ ;  $\gamma = 4.06$ ;  $max\_depth = 11$ ;  $min\_child\_weight = 8.4$ ;  $subsample = 0.934$ ;  $colsample\_bytree = 0.813$ ;  $nrounds = 30$ , dan  $mse.test.mean = 10.5965114$ .

Menggunakan kombinasi hyperparameter ini memberikan plot jumlah iterasi (jumlah *tree*) terhadap RMSE seperti yang ditunjukkan pada Gambar 38.



**Gambar 38.** Plotting RMSE terhadap jumlah iterasi pada proses *boosting* Prediksi (a) Trafik (b) *Throughput Downlink*

Dengan menggunakan nilai hasil *tuning hyperparameter* XGBoost yang sudah dipilih, plot dari nilai actual dan predicted dengan XGBoost untuk prediksi Trafik dan *Throughput Downlink* pada data testing secara visual dapat dilihat pada Gambar 39.



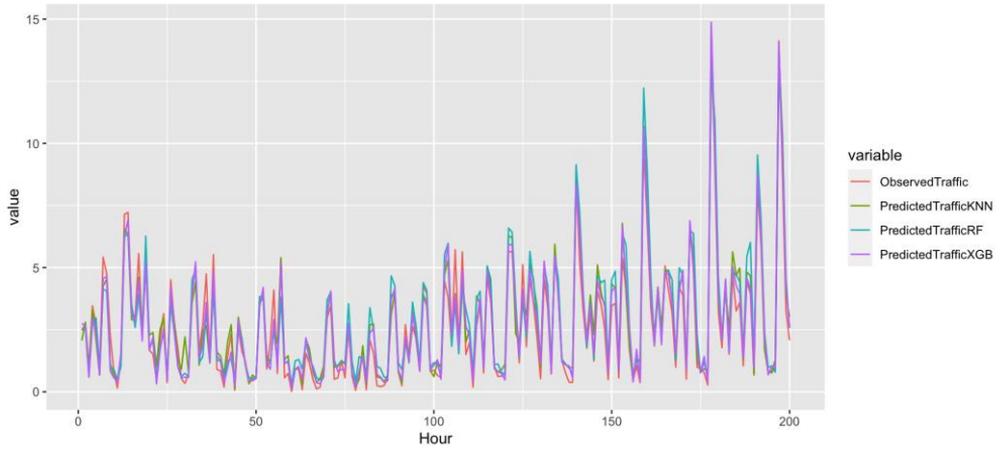
**Gambar 39.** Plotting nilai *actual* vs *predicted* dengan XGBoost untuk prediksi (a) Trafik dan (b) *Throughput Downlink*

### 3.5.2.4 Perbandingan Tiga Algoritma *Machine Learning*

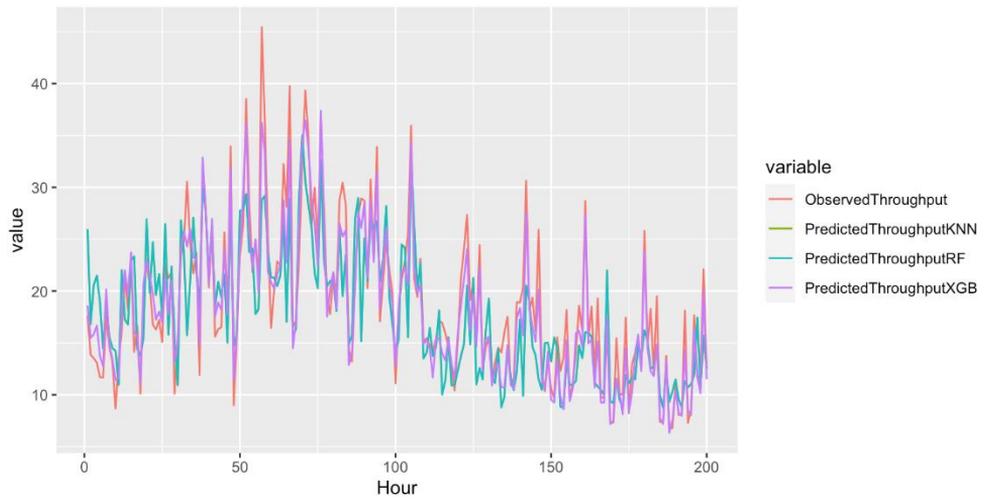
Dalam hasil di atas untuk prediksi trafik komunikasi dan *throughput* downlink, menggunakan tiga algoritma pembelajaran mesin: *KNN*, *Random Forest*, dan *XGBoost*, didapat hasil analisis prediksi trafik komunikasi menggunakan algoritma tersebut menunjukkan nilai *mean squared error* *KNN*, *Random Forest*, dan *XGBoost* masing-masing sebesar 0,7423673, 0,7224542, dan 0,4853583. Selain itu, nilai *coefficient of determination* (*R2*) untuk tugas prediksi yang sama masing-masing adalah 0,9618566, 0,931105, dan 0,9760282.

Sementara untuk hasil prediksi *throughput* downlink, nilai *MSE* yang diperoleh dari percobaan adalah 12.32170 untuk *KNN*, 19.19668 untuk *Random Forest*, dan 12.38203 untuk *XGBoost*. Nilai *R2* yang sesuai untuk algoritma ini masing-masing adalah 0,8731961, 0,6990887, dan 0,9438394.

Hasil ini menunjukkan bahwa *XGBoost* mengungguli *KNN* dan *Random Forest* dalam prediksi trafik komunikasi, serta prediksi *throughput*. Nilai *MSE* yang lebih rendah dan *R2* yang lebih tinggi menunjukkan bahwa *XGBoost* lebih efektif dalam menangkap pola dasar data dan membuat prediksi yang akurat. Selain itu, sifat *iterative* dari *XGBoost*, dikombinasikan dengan teknik regularisasinya, membantu mencegah *overfitting* dan mendorong generalisasi. Analisis ini menunjukkan bahwa *XGBoost* adalah algoritma pembelajaran mesin yang baik untuk kasus prediksi trafik komunikasi dan *throughput* downlink. Penggunaan metode ansambel seperti *XGBoost* untuk prediksi trafik komunikasi dan *throughput* downlink dapat menghasilkan peningkatan akurasi yang signifikan dibandingkan dengan algoritma lain seperti *KNN* dan *Random Forest*.



(a)



(b)

**Gambar 40.** Perbandingan Algoritma ML *Observed vs Predicted* (a) *Trafik*; (b) *Throughput Downlink*.



## 4 PENUTUP

Dalam tulisan diatas kita telah menjelajahi tema yang sangat relevan dan penting, yaitu **"Peran Pembelajaran Mesin pada Industri Telekomunikasi Berkelanjutan"**. Dari uraian yang telah disampaikan dapat dipahami bahwa pembelajaran mesin bukan hanya merupakan tren teknologi yang mengagumkan, tetapi juga akan menjadi kunci keberlanjutan dan kemajuan industri telekomunikasi di masa depan. Tidak diragukan lagi bahwa pembelajaran mesin dapat membantu mengatasi berbagai tantangan industri telekomunikasi ke depan dari meningkatnya kompleksitas jaringan hingga tuntutan untuk praktik berkelanjutan, pembelajaran mesin menjanjikan solusi yang inovatif dan efektif untuk menghadapi berbagai masalah ini. Namun di balik potensi besar dari pemanfaatan solusi berbasis pembelajaran mesin, pada pengimplementasiannya tidak akan terlepas dari berbagai masalah dan tantangan yang harus dihadapi.

Industri telekomunikasi telah menjadi tulang punggung dalam menyatukan dunia secara global. Dengan adanya teknologi pembelajaran mesin, industri ini memiliki peluang besar untuk meningkatkan efisiensi, keamanan, dan kualitas layanan yang ditawarkan kepada pengguna. Beberapa manfaat yang bisa didapat dari pemanfaatan pembelajaran mesin antara lain:

1. **Peningkatan Kinerja Jaringan:** Pembelajaran mesin dapat digunakan untuk mengoptimalkan kinerja jaringan telekomunikasi, meningkatkan kecepatan, dan menangani lonjakan trafik dengan lebih efisien. Dengan analisis yang mendalam terhadap data trafik komunikasi, algoritma pembelajaran mesin dapat membantu operator jaringan dalam membuat keputusan yang lebih cerdas untuk efisiensi penggunaan sumber daya yang berujung pada penghematan energi dan meningkatkan pengalaman pengguna.
2. **Pemeliharaan Proaktif:** Dengan memanfaatkan pembelajaran mesin untuk analisis prediktif, operator jaringan dapat mengidentifikasi potensi masalah atau kegagalan sistem secara proaktif. Hal ini memungkinkan untuk melakukan tindakan perbaikan atau pemeliharaan sebelum terjadi gangguan layanan yang signifikan, meningkatkan ketersediaan layanan secara berkelanjutan.

3. Personalisasi Layanan: Pembelajaran mesin memungkinkan penyedia layanan telekomunikasi untuk menyajikan layanan yang lebih personal dan relevan kepada pelanggan. Dengan menganalisis pola penggunaan dan preferensi pengguna, operator dapat menghasilkan rekomendasi yang lebih akurat dan membuat pengalaman pengguna lebih memuaskan.

Meskipun peluang dari pemanfaatan pembelajaran mesin pada industri telekomunikasi sangat besar, namun tidak lepas dari berbagai tantangan yang juga perlu diatasi. Beberapa tantangan yang harus dihadapi antara lain:

1. Kompleksitas Data: Industri telekomunikasi menghasilkan volume data yang besar dan beragam dari berbagai sumber, termasuk data jaringan, data pelanggan, dan data transaksi. Mengelola dan menganalisis data yang kompleks ini menjadi tantangan yang serius bagi penyedia layanan telekomunikasi.
2. Kekurangan Keterampilan: Implementasi pembelajaran mesin membutuhkan keterampilan teknis yang tinggi, mulai dari pemahaman statistik hingga pemrograman komputer. Kekurangan tenaga kerja yang memiliki keterampilan ini dapat menjadi hambatan dalam menerapkan solusi pembelajaran mesin di industri telekomunikasi.
3. Keamanan dan Privasi: Dengan adanya integrasi yang semakin erat antara teknologi telekomunikasi dan data pribadi pengguna, keamanan dan privasi menjadi perhatian utama. Tantangan dalam menjaga keamanan data dan melindungi privasi pengguna menjadi semakin kompleks seiring dengan berkembangnya ancaman siber.

Meskipun dihadapkan pada berbagai tantangan di atas, industri telekomunikasi memiliki potensi besar untuk berkembang dan berinovasi dengan memanfaatkan pembelajaran mesin. Untuk mengatasi berbagai tantangan ini, beberapa langkah strategis perlu dipertimbangkan:

1. Investasi dalam Pengembangan SDM: Penting bagi industri telekomunikasi untuk berinvestasi dalam pengembangan keterampilan SDM yang dibutuhkan untuk menerapkan pembelajaran mesin. Ini termasuk pelatihan dan pendidikan formal, serta pengembangan program pembelajaran yang terus menerus.

2. Kolaborasi dan Kemitraan: Industri telekomunikasi perlu bekerja sama dengan lembaga pendidikan, lembaga riset, dan perusahaan teknologi untuk mengembangkan solusi pembelajaran mesin yang inovatif dan efektif. Kolaborasi lintas sektor ini dapat mempercepat pengembangan dan adopsi teknologi baru.
3. Pengembangan Kebijakan dan Regulasi: Pemerintah dan badan pengatur perlu mengembangkan kebijakan dan regulasi yang mendukung inovasi dan penggunaan pembelajaran mesin di industri telekomunikasi. Hal ini termasuk pembentukan kerangka kerja yang jelas untuk perlindungan data dan privasi pengguna.

Dengan menerapkan langkah-langkah ini, kita dapat menciptakan masa depan yang lebih cerah dan berkelanjutan bagi industri telekomunikasi. Harapan ke depan adalah sebuah industri telekomunikasi yang tidak hanya efisien dan inovatif, tetapi juga bertanggung jawab secara sosial dan lingkungan. Perlu diingat juga bahwa pembelajaran mesin bukanlah tujuan akhir, tetapi alat yang kuat untuk mencapai visi dan tujuan yang lebih besar. Dengan semangat kolaborasi, inovasi, dan komitmen, dari semua pemangku kepentingan mari kita bersama-sama menjadikan industri telekomunikasi sebagai motor utama dalam membangun masyarakat yang lebih makmur dan sejahtera.



## 5 UCAPAN TERIMA KASIH

*Alhamdulillah wa syukurillah*, segala puji dan syukur saya panjatkan ke hadirat Allah Swt., karena berkat rahmat dan karunia-Nya saya bisa mendapat amanah sebagai Guru Besar di Institut Teknologi Bandung dalam bidang Jaringan Telekomunikasi Multimedia. Jabatan Guru Besar di perguruan tinggi merupakan salah satu posisi akademik tertinggi dalam hierarki akademis sebagai bentuk pengakuan atas dedikasi dan kontribusi dalam bidang kelimuannya. Capaian dan prestasi yang penulis raih ini bisa terwujud berkat dukungan banyak pihak, baik yang membantu secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih serta penghargaan yang sedalam-dalamnya kepada semua pihak, khususnya:

1. Orang tua penulis, ayah dan ibu tercinta: Saleh Wargadiwidjaja (alm.) dan, Itje Suwenda (alm) yang telah mendidik dan membesarkan saya dengan penuh kasih sayang.
2. Keluarga saya, istri, anak, mantu, dan cucu tercinta: Niknik Nilawati (istri); Tania Ardellasti (anak, serta mantu Jaka Rama Putra, cucu Dylan Elgard Rama dan Danica Eleina Rama); Taufiq Abdulaziz (anak, serta mantu Nadila Venadiaputri); Tatia Yasmin Faadhilah (anak, serta mantu Naufal Muhammad Judawisastra), Thalia Khansa Lathifah (anak).
3. Adik saya dan keluarga besarnya; Hendrawati Saleh (adik, serta suami Johny Koernadi. Alm., beserta anak dan mantu).
4. Keluarga besar istri saya, Mertua: M. E . Loenggana (alm.) dan Siti Soetinah (almh.), Keluarga besar: kakak/adik ipar beserta para keponakan semua.
5. Rektor ITB dan jajarannya; Senat Akademik ITB; dan Forum Guru Besar ITB.
6. Dekan Sekolah Teknik Elektro dan Informatika serta jajarannya, Senat STEI, beserta para Guru Besar STEI ITB.
7. Para pemberi rekomendasi saat pengusulan GB saya: Prof. Adit Kurniawan (alm.), Prof. Nana Rachmana Symbas, M.Eng., Prof. Andriyan Bayu Suksmono, Prof. Carmadi Machbub, Dr. Tutun Juhana (Dekan STEI), Prof. Hendra Gunawan (FMIPA ITB), Prof. Rendy Mardiana (TelU), Prof. Jazi Istianto (UGM), Prof. Yasuo Musashi

(Kumamoto University Jepang), Ismail Khalil (Johannes Kepler University, Austria)

8. Teman seperjuangan, yang selalu bersama-sama mengorganisir Konferensi Internasional TSSA dan ICWT yang terus berjalan secara rutin selama 17 tahun sampai saat ini, serta teman survei ke berbagai daerah 3T sebagai bagian dari Pengabdian Masyarakat: Pak Nana, Pak Tutun, dan Pak Iskandar. Khusus terima kasih untuk pak Nana yang selalu menanyakan dan mendorong untuk pengurusan GB saya.
9. Pembimbing saya saat kuliah, S-1: Prof. Ahmadi Djajasugita (alm.)/ Dr. Ir. John Welly, MSc.; S-2 dan S-3: Prof. Andrew C. Downton.
10. Kolega KK Teknik Telekomunikasi yang selalu kompak dan penuh kekeluargaan, baik Kolega yang residensi di Lab Telematika: Prof. Nana Rachmana, Ir. Sigit Haryadi MT., Dr. Tutun Juhana, Dr-Ing. Eueung Mulyana, Dr. Hamonangan Situmoreng, Rifqy Hamiki, S.T., M.T., Wervyan Salamanda, S.T., M.T. Dyah Rachmawati, S.T., M.Sc., Harastha, S.T., M.T.; maupun Kolega yang residensi di Lab Telekomunikasi Radio dan Gelombang Mikro: Prof. Andriyan Bayu Suksmono, Dr. Ir. M. Ridwan Effendy, MA.Sc., Dr. Iskandar, S.T., M.T., Dr.Eng Ahmad Munir, S.T., M.T., Dr. Effrina Yanti Hamid, M.T., Dr. Chairunissa, S.T., Dr. Joko Surayan, S.T., M.T., Dr. Sigit Arifianto, S.T., MSc., Dr. Irma Zakia, S.T., MSc., Izuddin, S.T., M.T.
11. TU STEI dan KK Teknik Telekomunikasi, Tendik, Teknisi Lab., ASMIK Prodi Teknik Telekomunikasi yang banyak membantu: Bu Poppy, Pa Asep Puady, Bu Ibni Anggraeni, Mas Daniel Wiyogo, Mbak Ria.
12. Para mahasiswa sarjana, magister, dan doktoral bimbingan saya, baik yang sudah lulus maupun yang masih menepuh pendidikan di ITB
13. Para guru-guru saya sejak TK Palasari Bandung, SD Halimun 3 Bandung, SMP 2 Bandung, SMA 3 Bandung, Departemen Teknik Elektro ITB.
14. Serta masih banyak pihak-pihak yang telah membantu yang tidak bisa saya sebutkan satu per satu.

Untuk semua pihak di atas saya mengucapkan terima kasih tak terhingga, semoga kebaikan semua pihak yang telah membantu mendapat balasan pahal dari Allah Swt. Aamiin Ya Rabbal Alamin.

# DAFTAR PUSTAKA

- 5G Americas (2023), Energy Efficiency and Sustainability in Mobile Communications Networks
- Alzbeta Fellenbaum, Hannah Taylor, Evaluating the Telecom Industry's Sustainability Potential, World Broadband Association
- A. Syed et al. (2016), "Route selection for multi-hop cognitive radio networks using reinforcement learning: An experimental study," IEEE Access, vol. 4, pp. 6304–6324, Sep. 2016
- Bappenas (2019), Visi Indonesia 2045, Kementerian PPN/Bappenas
- Berger, R. (2019), Position paper 5G Applications, Huawei
- BPS (2023), Statistik Telekomunikasi Indonesia 2022
- Buzzi, S., D'Amico, A., & Galati Giordano, G. (2014). Energy Efficiency of Cellular Networks: A Review. IEEE Wireless Communications, 21(6), 47-55
- Buzzi, S., Chih-Lin I, Thierry E. Klein, H. Vincent Poor, Chenyang Yang, and Alessio Zappone (2016), A Survey of Energy-Efficient Techniques for 5G Networks and Challenges Ahead, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.34, Issue: 4, April 2016
- Chafika Benzaid, Tarik Taleb (2020), AI-Driven Zero Touch Network and Service Management in 5G and Beyond: Challenges and Research Directions, IEEE Network PP(99):1-9, Feb 2020
- Chen, L., Ramli, K., Faisal., F., Suryanegara, H.M (2023)., Accelerating Digital Transformation In Indonesia:Technology, Market, and Policy, ERIA
- Crawshaw, J. (2022), Lessons in Zero- Touch Operations from the Coalface, Omdia
- Day, J.D., H. Zimmermann (1983), The OSI Reference Model, Proceedings of the IEEE, Vol. 71 Issue 12, 1983
- Ericsson Report (2020), Breaking the energy curve An innovative approach to reducing mobile network energy use, Ericsson, 2020
- Ericsson White Paper (2023), Defining AI native: A key enabler for advanced intelligent telecom Networks, Ericsson White Paper BCSS-23:000056 Uen , Feb. 2023

- ETSI White Paper (2020), No. #34, Artificial Intelligence and future directions for ETSI, 1st edition – June 2020
- Fan C., Li, B., Zhao, C., Guo, W., and Liang, T.C (2018), “Learning-based spectrum sharing and spatial reuse in mm-wave ultra dense networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 6, pp. 4954–4968, Jun. 2018
- Farooq, M. S., Sadeque, F., & Khan, S. U. (2015), Impact of Smartphone's on Society. *European Journal of Scientific Research*, 98(2), 216-226
- Fatima Hussain, Syed Ali Hassan, Rasheed Hussain, and Ekram Hossain (2020), Machine Learning for Resource Management in Cellular and IoT Networks: Potentials, Current Solutions, and Open Challenges, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020
- Ferhat Ozgur Catak, Murat Kuzlu, Evren Catak, Umit Cali, Devrim Unal (2022), Security concerns on machine learning solutions for 6G networks in mmWave beam prediction, *Physical Communication*, Vol. 52, June 2022
- GSMA (2020), *The Mobile Economy Asia Pacific 2020*
- GSMA Report (2022), *Mobile Net Zero: GSM Association State of the Industry on Climate Action 2022*
- GSMA (2022a), *ESG Metrics for Mobile Realizing value for society through common industry KPIs*, June 2022
- GSMA (2022b), *The Enablement Effect 2021, How can mobile tech help us reach Net Zero faster, easier, and cheaper*
- GSMA (2023a) *Mobile Connectivity Index 2023*, Global System for Mobile Communications Association
- GSMA Report (2023b), *Achieving Climate Targets A step-by-step guide for mobile network operators to achieve near-term science-based targets*
- Hatt, T., Kolta, E. (2021), Industry pathways to net zero Mobile and digital technology in support of industry decarbonization, *GSMA Intelligence*
- Hatt, T. (2023), *Green is good for business: embedding sustainability in digital transformation*, *GSMA Intelligence*
- Hodara, H., Skaljo, E. (2021): From 1G to 5G, Fiber and Integrated Optics, DOI: 10.1080/01468030.2021.1919358
- Hossain, M.A., Hossain, A., Ansari, N., (2022), AI in 6G: Energy-Efficient Distributed Machine Learning for Multilayer Heterogeneous Networks, *IEEE Network* 4 June 2022

- Howe, S (2023), Social Media Statistics for Indonesia [Updated 2023], Meltwater.
- Huiling Jiang, Qing Li, Yong Jiang, GengBiao Shen (2021), When machine learning meets congestion control: A survey and comparison, *Computer Networks* 192(4), March 2021
- Ismawan, D.J., Wandebori, H. (2024), Business Sustainability Model for Telecommunications Infrastructure in Rural Area, *IJEEI* 2024
- Kleyton da Costa (holisticai.com), Practical and Societal Dimensions of Explainable AI, *Datascience*, [holisticai.com](https://holisticai.com)
- Lian Jye Su, ABI Research (2020), Environmentally Sustainable 5g Deployment: Energy Consumption Analysis And Best Practices
- Lim, B. W. Y., Ng, J. S., Xiong, Z., Jin, J., Zhang, Y., Niyato, D., Leung, C. & Miao, C. (2021). Decentralized edge intelligence : a dynamic resource allocation framework for hierarchical federated learning. *IEEE Transactions On Parallel and Distributed Systems*, 33(3), 536-55, 2021.
- Manuel Eugenio Morocho-Cayamcela, Haeyoung Lee, And Wansu Lim (2019), Machine Learning for 5G/B5G Mobile and Wireless Communications: Potential, Limitations, and Future Directions, *IEEE Access*, Sept. 2019
- Mitchell, T. M. (1997). *Machine learning*. McGraw Hill Series in Computer Science. Maidenhead: McGraw-Hill
- NGMN Alliance (2021), Green Future Networks Sustainability Challenges and Initiatives in Mobile Networks, NGMN Alliance
- ITU (2011). *Handbook for the Collection of Administrative Data on Telecommunications/ICT*
- ITU-R (2015), Recommendation ITU-R M.2083-0 (09/2015), IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond
- ITU (2018), *Regulatory Challenges And Opportunities In The New ICT Ecosystem*
- ITU-T Technical Specification (2019), *Unified architecture for machine learning in 5G and future networks*
- ITU Publication (2021), *The economic impact of broadband and digitization through the COVID-19 pandemic: Econometric modelling*
- ITU-R (2023), *IMT towards 2030 and beyond*

- Kemp, S. (2023), *Digital 2023: Indonesia*, Datareportal.
- Kominfo (2022), *Laporan Kominfo 2022: Menghubungkan dan Memajukan Bangsa Melalui Akselerasi Transformasi Digital*
- Kominfo (2023), *Visi Indonesia Digital 2045*
- Kouyoumdjieva, S., Markendahl, J., & Wictor, I. (2017). 5G for Vertical Industries—Automotive, Transportation, and Smart Cities. In 2017 14th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC) (pp. 470-475)
- LPPM ITB (2018), *Kajian Spektrum Roadmap untuk Mobile Broadband 2019-2024*
- Madalena Ramos Cilínio (2022), Thesis, Técnico Lisboa
- McCarthy, J. (2007). *What Is Artificial Intelligence?* Technical report, Stanford University
- NGMN Alliance (2021), *Green Future Networks Sustainability Challenges and Initiatives in Mobile Networks*, NGMN Alliance
- OECD (2008), *Broadband Growth and Policies in OECD Countries*.
- Raj, P., & Manogaran, G. (2020). A comprehensive review on security and privacy issues in mobile communication environment. *Journal of Network and Computer Applications*, 148, 102470
- Recommendation ITU-T L.1470, Series L: Environment And ICTs, Climate Change, E-Waste, Energy Efficiency; Construction, Installation And Protection Of Cables And Other Elements Of Outside Plant, Greenhouse gas emissions trajectories for the information and communication technology sector compatible with the UNFCCC Paris Agreement, ITU-T.
- Rinaldi, S., Feeney, L. M., & Pahl, C. (2021). 5G-IoT for Smart Manufacturing: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6), 4177-4185
- Rhys Hefin I (2020), *Machine Learning with R, the tidyverse and mlr*, Manning
- Rohit Kumar, Saurav Kumar Gupta, Hwang-Cheng Wang, C. Shyamala Kumari, and Sai Srinivas Vara Prasad Korlam (2023), *From Efficiency to Sustainability: Exploring the Potential of 6G for a Greener Future*, *Sustainability* 2023, 15, 16387
- Saleem, Y. et al. (2017), "Clustering and reinforcement-learning-based routing for cognitive radio networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 24, no. 4, pp. 146–151, Aug. 2017

- Sasmita Mohanty, Antonio Carrizo Moreira (2014), Sustainability in Global Telecommunications, IEEE Potentials, September 2014
- Seunghwa Jun, Jongsur Park, Jeong Yoon Kim (2022), Digital Transformation Landscape in Asia and the Pacific: Aggravated Digital Divide and Widening Growth Gap, United nation ESCAP: Economic and Social Commission for Asia and the Pacific
- Smith, J., & Johnson, L. (2019), Digital Inclusion in Mobile Communication: A Global Perspective, International Journal of Mobile Communications, 17(4), 2019, 394-411
- Stige, Åsne; Zamani, Efpraxia D.; Mikalef, Patrik; Zhu, Yuzhen (2023), Artificial intelligence (AI) for user experience (UX) design: a systematic literature review and future research agenda, Journal of Information Technology and People, 2023
- Suryanegara, M. (2023), 'Technology Progress and Adoption' in Chen,L., K.Ramli, ,F.F.Hastiadi, and M.Suryanegara (eds.), Accelerating Digital Transformation in Indonesia: Technology, Market and Policy. Jakarta: ERIA, pp.37-76
- Sasmita Mohanty, Antonio Carrizo Moreira, Sustainability in Global Telecommunications, IEEE Potentials, September 2014
- Song Wang, Juan Balarezo, Sithamparanathan Kandeepan, Akram Al-Hourani, Karina Gomez And Ben Rubinstein (2021), Machine Learning in Network Anomaly Detection: A Survey, IEEE Access Vol. 4, 2021
- Tulsi Pawan Fowdur, Bhuvaneshwar Doorgakant (2023), A Review of Machine Learning Techniques for Enhanced Energy Efficient 5G and 6G Communications, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 122, June 2023
- Twimbit (2023), Indonesia Telecoms Update 2023
- WBBA (World Broadband Association) white paper (2022), The Importance Of Environmental Sustainability In Telecom Service Providers' Strategy, World Broadband Association
- Wen Wu, Conghao Zhou, Mushu Li, Huaqing Wu (2022), AI-Native Network Slicing for 6G Networks, IEEE Wireless Communications 29(1):96-103, Feb. 2022
- Wessam M. Salama and Moustafa H. Aly (2021), IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.1051 012025

- Wojciech Samek, Slawomir Stanczak, Thomas Wiegand (2018), The Convergence Of Machine Learning And Communications, ITU Journal: ICT Discoveries, Vol 1(1), March 2018
- Xingqin Lin (2023), Artificial Intelligence in 3GPP 5G-Advanced: A Survey, IEEE ComSoc Publication, 6 Sept. 2023
- Yang, T., Qian, Y., Yin, H., Jiang, T., & Niu, Z. (2016). Energy and Carbon Footprint Reduction in Wireless Communication Systems: A Survey. IEEE Access, 4, 7689-7703
- Yandong Shi, Lixiang Lian, Yuanming Shi, Zixin Wang, Yong Zhou, Liqun Fu, Lin Bai, Jun Zhang, and Wei Zhang (2023), Machine Learning for Large-Scale Optimization in 6G Wireless Networks, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 25, Issue: 4, 2023
- Yaohua Sun, Mugen Peng, Yangcheng Zhou, Yuzhe Huang, and Shiwen Mao (2019), Application of Machine Learning in Wireless Networks: Key Techniques and Open Issues, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 21, Issue 4, 2019
- Yu, Y., Xu, Y., Gu, X., & Wang, G. (2020). Secure data sharing for mobile communication networks: A survey. IEEE Access, 8, 21539-21551
- Y. Zhang, W. P. Tay, K. H. Li, M. Essegir, and D. Gaiti (2016), "Learning temporal-spatial spectrum reuse," IEEE Trans. Commun., vol. 64, no. 7, pp. 3092–3103, Jul. 2016

# CURRICULUM VITAE



Nama : Hendrawan  
Tempat/tgl lahir : Bandung, 5 Juli 1960  
Kel. Keahlian : Teknik Telekomunikasi  
Alamat Kantor : Jl. Ganesha 10, Bandung  
Nama Istri : Niknik Nilawati  
Nama Anak : Tania Ardellasasti  
Taufiq Abdulaziz  
Tatia Yasmin Faadhilah  
Thalia Khansa Laathifah

## I. RIWAYAT PENDIDIKAN

No.	Jenjang Pendidikan	Perguruan Tinggi	Tahun Lulus	Bidang
1.	S1	Institut Teknologi Bandung, Indonesia	1985	Teknik Elektro
2.	S2	University of Essex, UK	1990	Telecommunication and Information Systems
3.	S3	University of Essex, UK	1995	Electronics Systems Engineering

## II. RIWAYAT KERJA DI ITB

No.	Nama Jabatan	Tahun
1.	Ketua Laboratorium Telematika ITB	2001 - 2006
2.	Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro	2006 - 2011
3.	Ketua Program Studi Doktor Teknik Elektro dan Informatika	2006 - 2011
4.	Anggota Satuan Pengawas Internal ITB	2020 - 2023
5.	Ketua Kelompok Keilmuan Teknik Telekomunikasi STEI ITB	2023 -
6.	Anggota Senat Akademik ITB	2023
7.	Sekretaris Senat STEI ITB	2023 -

## III. RIWAYAT KEPANGKATAN

No.	Pangkat	Golongan Ruang	TMT
1.	CPNS	III/a	01-02-1987
2.	PNS/Penata Muda	III/a	01-09-1988
3.	Penata Muda Tkt.1	III/b	01-10-1996
4.	Penata	III/c	01-10-2000
5.	Penata Tkt. 1	III/d	01-04-2004
6.	Pembina	IV/a	01-04-2017

No.	Pangkat	Golongan Ruang	TMT
7.	Pembina Tkt. 1	IV/b	01-04-2019
8.	Pembina Utama Muda	IV/c	01-04-2024

#### IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

No.	Jabatan Fungsional	TMT
1.	Asisten Ahli Madya	30-09-1996
2.	Asisten Ahli	01-10-1996
3.	Lektor	01-01-2001
4.	Lektor Kepala	01-08-2016
5.	Guru Besar	01-06-2023

#### V. KEGIATAN PENELITIAN

No.	Tim Peneliti	Judul Penelitian	Tahun/periode; Sumber dana
1.	Hendrawan (Ketua Peneliti), Yasuo Mashashi (Mitra, Kumamoto University); No Kontrak: 37/IT1.B07.1/SPP-LPPM/I/2024	Simulation-Assisted Machine Learning untuk Menentukan Jens Trafik Untuk Penerapan Network Slicing 5G	2024 – Program Riset Internasional
2.	Hendrawan (Ketua Peneliti); 765/IT1.C12/TU.10/2024	Accuracy-Sensitivity based Bandwidth Allocation for Video Analytics Applications via Real-time Automated Video Compression Parameter Tuning	Riset PPMI GB 2024
3.	Hendrawan (Ketua Peneliti), Iskandar, Veronica Windha Mahyastuty, Dimas Aji Pangestu; Nomor Kontrak 1371e/IT1.C12/TA.00/2022	Pengembangan Algoritma Clustering Adaptif pada Jaringan Massive Sensor Network (IoT), Peneliti Utama, PDUPT 2021	2020 – 2022; PDUPT
4.	Hendrawan (Ketua Peneliti), Tutun Juhana, Budi Rahardjo; Nomor Kontrak 1371i/IT1.C12/TA.00/2022	Teknik Deteksi Malware dengan Image-based Feature Extraction berbasis Multimodal Machine Learning, Penelitian Disertasi Doktor, 2021	2020 – 2021; PPD
5.	Tim Lab Telematika	Buoy Untuk Smart Aquaculture Monitoring System	2019
6.	Hendrawan (Ketua Peneliti), Chandra Setiawan, No Kontrak 2/E1/KP.PTNBH/2019, Tanggal 29-03-2019	Pengembangan Voice Switcing Control System (VSCS) untuk Sistem Air Traffic Control (ATC) Untuk Bandara Kecil Menengah di Indonesia	2018 – 2020; PTUPT

No.	Tim Peneliti	Judul Penelitian	Tahun/periode; Sumber dana
7.	Hendrawan (Ketua Peneliti), Adit Kurniawan, Istikmal, Sofia naming, No Kontrak 27/SP2H/PTNBH/DRPM/2018, Tanggal 01-02-2018	Peningkatan Laju Data Di Jaringan 5G Dengan Metode Cross Layer Pada Protokol Komunikasi Untuk Mengatasi Interferensi, Kongesti, Serta Kualitas Jalur Pengiriman Data Yang Rendah	2017- 2019; Penelitian Tim Pasca Sarjana
8.	Hendrawan Sebagai Peneliti Utama, No Kontrak 077/SP2H/LT/DRPM/II/2016, Tanggal 17-02-2016	Sistem Komunikasi Video Terkompresi yang Aman (Secure) untuk Keamanan dan Pertahanan	2016 – 2018; PTUPT
9.	Hendrawan Sebagai Peneliti Utama, No Kontrak 077/SP2H/LT/DRPM/II/2016	Studi Pengiriman Video Terkompresi Video Streaming Pada Link Transmisi dengan Packet Loss dan Jitter Tinggi, Tanggal 7-02-2016	2016 – 2018; PTUPT
10.	Hendrawan Sebagai Peneliti Utama, No Kontrak STEI.PN-1-04-2013, Tanggal 01-04-2013	Pengembangan Testbed Intelligent Transport System untuk Manajemen Trafik Lalulintas,	2013; Desentralisasi DIKTI
11.	Hendrawan Sebai Peneliti utama, Iskandar, Irene Mahardhika, No Kontrak 0275/I1.C07/PL/2012, Tanggal 01-02-2012	Broadcast DVB over Cooperative Network dengan Scalable Video Coding	2012; Riset dan Inovasi KK ITB
12.	Hendrawan Sebagai Peneliti Utama, No Kontrak , Tanggal 1.12.04/SEK/IR/PPK/II/2011, Tanggal 28-02-2011	Pengembangan Konten Middleware Untuk Aplikasi Distribusi Materi Ajar Pada Platform Siaran TV Digital DVB-H	2011; Insentif Riset Terapan Ristek
13.	Hendrawan Sebagai Peneliti Utama, No Kontrak 1083/K01.16/INST-ITB/SP3/2010, Tanggal 01-07-2010	Pengembangan Intelligent Video untuk Surveillance Pengamanan Kawasan dengan Notifikasi Otomatis	2010; Riset Peningkatan Kapasitas ITB

## VI. PUBLIKASI

1. Setia Juli Irzal Ismail, Hendrawan, Budi Rahardjo, Yasuo Musashi, MalSSL – Self-Supervised Learning for Accurate and Label-Efficient Malware Classification, IEEE Access 2024 (accepted for publication)
2. Baud Haryo Prananto, Iskandar, Hendrawan, Adit Kurniawan, LSTM Neural Network Algorithm for Handover Improvement in a Non-Ideal

Network using O-RAN Near-RT RIC, IEICE TRANS COMMUNICATION 2024 (accepted for publication June 2024)

3. Hajiar Yuliana, Iskandar, Hendrawan, Comparative Analysis of Machine Learning Algorithms for 5G Coverage Prediction: Identification of Dominant Feature Parameters and Prediction Accuracy, IEEE Access, Vol. 12, 2024
4. Hilal H. Nuha, , Fazmah Arif Y, and Hendrawan, Enhanced Multipath TCP to Improve the Mobile Device Network Resiliency, International Journal of Computing and Digital Systems, 2024
5. Hendrawan, Dimas Aji Pangestu, Iskandar; Energy-Aware Medium Access Control Protocol and Clustering Algorithm for Clustered Wireless Sensor Networks with High Altitude Platforms as the Base Station, Intl. J. on Electrical Engineering and Informatics; Vol 14, No. 4, Dec 2022; ISSN 2085-6830
6. Hendrawan; Accessibility Degradation Prediction on LTE/SAE Network Using Discrete Time Markov Chain (DTMC) Model, Journal of ICT Research and Applications, Vol 13, No 1 (2019); ISSN: 2337-5787
7. Veronica Windha Mahyastuty, Iskandar, Hendrawan, Mohammad Sigit Arifianto; Adaptive Successive Interference Cancellation using Deep Learning for High Altitude Platform Station in Various KRician Channel, IAENG International Journal of Computer Science, Volume 49, Issue 2: June 2022; ISSN 1819-922
8. Veronica Windha Mahyastuty, Iskandar, Hendrawan, Mohammad Sigit Arifianto; Medium Access Control Protocol for High Altitude Platform Based Massive Machine Type Communication, J. of ICT Research and Applications Vol. 16, No. 2, 2022; ISSN 2337-5787
9. Yudha Purwanto\*, Kuspriyanto, Hendrawan, Budi Rahardjo: "Cost Analysis for Classification-based Autonomous Response Systems", International Journal of Network Security, Vol.20, No.1, 1 January 2018; ISSN 1816-3548
10. Istikmal, Adit Kurniawan, Hendrawan, Joint Routing and Congestion Control in Multipath Channel Based on Signal to Noise Ratio with Cross-Layer Scheme, International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 2018, Vol. 8, No. 4, ISSN: 2088-8708
11. Yudha Purwanto, Kuspriyanto, Hendrawan, Budi Rahardjo, Cost Analysis for Classification-based Autonomous Response Systems, International Journal of Network Security, Vol.20, No.1, 2018, ISSN 1816-3548

12. Sofia Naning Hertiana, Adit Kurniawan, Hendrawan, and Udjianna Sekteria Pasaribu, Optimal Rate Allocation for CongestionControl Support in SDN, International Journal on Electrical Engineering and Informatics (IJEI2018), Vol.10 No.2, June 2018, ISSN 2089-3272
13. Sofia Naning Hertiana, Adit Kurniawan, Hendrawan, and Udjianna Sekteria Pasaribu, Effective Router Assisted Congestion Control for SDN, International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE 2018), Vol 8, No 6, December 2018, ISSN: 2088-8708
14. Veronica Windha Mahyastuty, Iskandar, Hendrawan, M. Sigit Arifianto, Wireless Sensor Network over High Altitude Platform, TELKOMNIKA Vol 16, No 1, 2018, ISSN: 1693-6930, e-ISSN: 2302-9293
15. Istikmal, Adit Kurniawan, Hendrawan, Selective Route Based on SNR with Cross layer Scheme in Wireless Adhoc Network, Journal of Computer Networks and Communications, Volume 2017, ISSN: 2090-7141 (Print), ISSN: 2090-715X (Online)
16. I Wahidah, Hendrawan, TLR Mengko, AB Suksmono, Parameter Estimation for Coefficient Thresholding in Block-based Compressive Video Coding, International Journal of Imaging and Robotics 15 No. 3, 2015, ISSN 2231-525X (formerly known as the "International Journal of Imaging" (ISSN 0974-0627))
17. A Najmurrokhman, B Riyanto, A Syaichu-Rohman, H Hendrawan, Dissipative Controller Design for Networked Control Systems via the Markovian Jump System Approach, Journal of Engineering and Technological Sciences 45 (1), 25-46, 2013, ISSN: 2337-5779, E-ISSN: 2338-5502
18. Nana Rachmana, Hendrawan, Sugihartono, Andriyan B. Suksmono, Interpretation Target Pattern of a Buried Basic Object on Surface Ground Penetrating Radar System, International Journal on Electrical Engineering and Informatics - Volume 1, Number 1, 2009
19. Aditya Kurniawan, Kholilatul Wardani, Eueung Mulyana, Hendrawan, Image Based Centre Object CalculationUsing Coordinate AveragingMethod for Object FollowingMobile Robot, Journal of Automation and Control Engineering Vol. 8, No. 1, June 2020, ISSN 2301-3702
20. Wawan Hermawan, Hendrawan, Eueung Mulyana, Dini Fronitasari, Stella Bella Vita, Farhan Ardiya Fernanda, Single Sign On Using Keycloak Integrated Public Key Infrastructure for User Authentication In Indonesia's Electronic Based Government System, Advance Sustainable Science, Engineering and Technology (ASSET), Vol. 5, No.2, July 2023,

pp. 0230204-01 ~ 0230204-016, ISSN: 2715-4211 DOI:  
<https://doi.org/10.26877/asset.v5i2.15795>

21. Hendrawan\*, Ayu Rosyida Zain, Sri Lestari: "Performance Evaluation of A2-A4-RSRQ and A3-RSRP Handover Algorithms in LTE Network", *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*, Vol 19, No 2 (2019), ISSN: 1411-8289 (print) ISSN: 2527-9955 (online), pp. 64-74, doi: 10.14203/jet.v19.64-74
22. Veronica Windha Mahyastuty, Iskandar, Hendrawan, Wireless Sensor Network Exploiting High Altitude Platform in 5G Network [Jaringan Sensor Nirkabel Menggunakan High Altitude Platform pada Jaringan 5G, *Buletin Pos dan Telekomunikasi*, Vol 15, No 1 (2017), p-ISSN 1693-0991, e-ISSN 2443-1524. Terakreditasi sebagai Jurnal Nasional oleh LIPI dengan SK No. 32a/E/KPT/2017; Accreditation Number (SINTA 2)
23. Amadea Rashida, Christopher Ivan Gunardi, Hendrawan, Eueung Mulyana, Wawan Hermawan, "Applying CNN to Classify Gender for Identity Verification System", 2023 9th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), Solo, Indonesia, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICWT58823.2023.10335249
24. . P. Prayogo, Hendrawan, E. Mulyana and W. Hermawan, "A Novel Approach for Face Recognition: YOLO-Based Face Detection and Facenet", 2023 9th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), Solo, Indonesia, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICWT58823.2023.10335263.
25. D. S. Alya, Hendrawan, E. Mulyana and W. Hermawan, "Development of Passive Liveness Detection System Based on Deep Learning LivenessNet to Overcome Face Spoofing," 2023 17th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA), Lombok, Indonesia, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/TSSA59948.2023.10366908.
26. D. A. Nur Fauzi, Hendrawan, E. Mulyana and W. Hermawan, "Development of Active Liveness Detection System Based on Deep Learning ActivenessNet to Overcome Face Spoofing,"
27. M. A. Faqih, Hendrawan, E. Mulyana and W. Hermawan, "On the Performance of Face Recognition Models for Local Faces Dataset," 2023 17th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA), Lombok, Indonesia, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/TSSA59948.2023.10366896.
28. C. I. Gunardi, A. Rashida, Hendrawan, E. Mulyana and W. Hermawan, "Web-Based Gender Classification ML Application Development for e-KYC," 2023 17th International Conference on Telecommunication

- Systems, Services, and Applications (TSSA), Lombok, Indonesia, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/TSSA59948.2023.10366938.
29. H. Yuliana, Iskandar and Hendrawan, "A Review of Coverage Predictions in Mobile Communication Systems using Machine Learning Algorithm", 2023 17th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA), Lombok, Indonesia, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/TSSA59948.2023.10367027.
  30. H. Agusnam, I. Zakia and Hendrawan, "Exploring Deep Learning for Improved MIMO Performance: A Design Research Methodology Approach", 2023 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), Bandung, Indonesia, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEEI59426.2023.10346756
  31. A. A. F. Poeloengam, Hendrawan, E. Mulyana and W. Hermawan, "Web-based Face Detection and Recognition using YOLO and Dlib", 2023 17th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA), Lombok, Indonesia, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/TSSA59948.2023.10366984.
  32. T. A. Wibowo, N. R. Syambas, R. Mayasari, Hendrawan, S. Raniprima and G. P. Satriawan, "Performance Analysis of NDN Proactive Routing for Future Content-Based Network", 2022 8th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), Yogyakarta, Indonesia, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICWT55831.2022.9935432.
  33. D. C. L. Gaol, Hendrawan and S. J. I. Ismail, "Development of Malware Classification Technique Based on Machine Learning Neural Network and High Order Markov Chain", 2022 8th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), Yogyakarta, Indonesia, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICWT55831.2022.9935479.
  34. S. J. I. Ismail, H. P. Gemilang, B. Rahardjo and Hendrawan, "Self-Supervised Learning Implementation for Malware Detection", 2022 8th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), Yogyakarta, Indonesia, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICWT55831.2022.9935463.
  35. D. A. Pangestu, H. Hendrawan and I. Iskandar, "Parameter-Based Clustering Algorithm for Clustered Wireless Sensor Networks with High Altitude Platforms as the Base Station", 2021 7th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), Bandung, Indonesia, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICWT52862.2021.9678466
  36. Muhammad Ammar Wibisono, Alvin Mustafa, Iskandar, Hendrawan, Tutun Juhana, Achmad Munir: "Automatic VSAT antenna pointing system featured with non-horizontal alignment autocorrect", 2017 7th

- International Annual Engineering Seminar (InAES), 1-2 Aug. 2017 Yogyakarta, ISBN: 978-153863111-9, DOI: 10.1109/INAES.2017.8068543, Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
37. Alvin Mustafa, Hendrawan: "Secure HEVC video by encrypting header of wavefront parallel processing", 11th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA), 26-27 Oct. 2017 Senggigi, Lombok, Pages 1 - 4, ISBN: 978-153863546-9, DOI: 10.1109/TSSA.2017.8272948, Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., <https://ieeexplore.ieee.org/document/8272948>
  38. Hendrawan: "RRC success rate accessibility prediction on SAE/LTE network using Markov chain model", 11th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA), Volume 2018-January, Pages 1 - 5, 26-27 Oct. 2017 Senggigi, Lombok, ISBN: 978-153863546-9, DOI: 10.1109/TSSA.2017.8272940, Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., <https://ieeexplore.ieee.org/document/8272940>
  39. Hendrawan, Nugraha Budi Samawi: "Voice Switching Control System (VSCS) for Air Traffic Control System for Small Airpor", 4th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), 12-13 July 2018 Nusa Dua, Bali, ISBN: 978-153866163-5, DOI: 10.1109/ICWT.2018.8527797, Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., <https://ieeexplore.ieee.org/document/8527797>
  40. Gaous Afrizal, Hendrawan: "Impact of Random and Burst Packet Loss on Voice Codec G.711, G.722, G.729, AMR-NB, AMR-WB", 4th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), 12-13 July 2018, Nusa Dua, Bali, ISBN: 978-153866163-5, DOI: 10.1109/ICWT.2018.8527812, Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., <https://ieeexplore.ieee.org/document/8527812>
  41. Tody Ariefianto Wibowo, Nana Rachmana Syambas, Hendrawan: "Overhead of Named Data Networking Routing Protocol", 12th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA), Yogyakarta 4-5 Oct. 2018, ISBN: 978-153866940-2, DOI: 10.1109/TSSA.2018.8708842, Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., <https://ieeexplore.ieee.org/document/8708842>
  42. Yudha Purwanto, Kuspriyanto, Hendrawan, Budi Rahardjo: "The Decision Accuracy of Acquaintance List from Different Risk-cost Analysis", 2018 12th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA), Yogyakarta 4-5 Oct. 2018, ISBN: 978-153866940-2, DOI: 10.1109/TSSA.2018.8708840, Publisher:

Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.,  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8708840>

43. M. Rinaldy, Iskandar, Hendrawan, I.Y.M. Edward: "Design and Implementation of Nodes on Air Pollution Monitoring System Using Wireless Sensor Network Based on HAPS", 5th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), Yogyakarta 25-26 July 2019, ISBN: 978-172814796-3, DOI: 10.1109/ICWT47785.2019.8978253, Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., <https://ieeexplore.ieee.org/document/8978253>
44. Beni Rio Hermanto, Iskandar, Hendrawan, Ian Joseph Matheus Edward: "Implementation of Service Level Measurement Based on System Uptime Sensor of Network Device in Internet Connection Service", 5th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), Yogyakarta 25-26 July 2019, ISBN: 978-172814796-3, DOI: 10.1109/ICWT47785.2019.8978216, Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., <https://ieeexplore.ieee.org/document/8978216>
45. Aditya Kurniawan, Hendrawan, Eueung Mulyana, Kholilatul, Wardani: "Image Based Centre Object Calculation Using Coordinate Averaging Method For Object Following Mobile Robot", 2019 2nd International Conference of Intelligent Robotic and Control Engineering (IRCE), Singapore 25-28 Aug. 2019, Pages 13 - 17, ISBN: 978-172814192-3, DOI: 10.1109/IRCE.2019.00010, Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., <https://ieeexplore.ieee.org/document/9107574>
46. Tody Ariefianto Wibowo, Nana Rachmana Syambas, Hendrawan: "Named Data Network (NDN) Scalability Problem", 2019 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob), 5-7 Nov. 2019, DOI: 10.1109/APWiMob48441.2019.8964134, ISBN: 978-1-7281-4866-3, Publisher: IEEE, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8964134>
47. Candra Setiawan, Hendrawan: "Design and Analysis of the Performance of Voice Switching Control System Prototypes for Air Traffic Control", 2020 6th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), Yogyakarta 3-4 Sept. 2020, ISBN: 978-172817596-6, DOI: 10.1109/ICWT50448.2020.9243652, Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., <https://ieeexplore.ieee.org/document/9243652>
48. Setia Juli Irzal Ismail, Hendrawan, Budi Rahardjo: "A Survey on Malware Detection Technology and Future Trends", 2020 14th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA), Bandung 4-5 Nov. 2020, ISBN: 978-172817598-0, DOI:

- 10.1109/TSSA51342.2020.9310841, Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., <https://ieeexplore.ieee.org/document/9310841>
49. Veronica Windha Mahyastuty, Hendrawan, Iskandar, Mohammad Sigit Arifianto: "Survey of Clustering Techniques in Internet of Things Architecture", 2020 14th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA), Bandung 4-5 Nov. 2020, ISBN: 978-172817598-0, DOI: 10.1109/TSSA51342.2020.9310807, Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., <https://ieeexplore.ieee.org/document/9310807>
50. Dimas Aji Pangestu, Hendrawan, Iskandar: "Parameter-Based Clustering Algorithm for Clustered Wireless Sensor Networks with High Altitude Platforms as the Base Station", 7th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), Bandung 19-20 Aug. 2021, ISBN: 978-1-6654-4402-6, DOI: 10.1109/ICWT52862.2021.9678466, Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., <https://ieeexplore.ieee.org/document/9678466>
51. Radifa Akbar Abhesa, Hendrawan, Setia Juli Irzal Ismail: "Classification of Malware Using Machine Learning Based on Image Processing",

## VII. PENGHARGAAN

No.	Nama Penghargaan	Pemberi penghargaan	Tahun
1.	Satyalancana Karya Satya XXX Tahun	Presiden	2019
2.	Satyalancana Karya Satya 20 Tahun	Presiden	2003
3.	Satyalancana Karya Satya XX Tahun	Presiden	2010
4.	Piagam Penghargaan Pengabdian 25 Tahun ITB	Rektor ITB	2022





📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,  
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132  
☎️ +62 22 20469057  
🌐 [www.itbpress.id](http://www.itbpress.id)  
✉️ [office@itbpress.id](mailto:office@itbpress.id)  
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92  
APPTI No. 005.062.1.10.2018

## Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132  
E-mail: [sekretariat-fgb@itb.ac.id](mailto:sekretariat-fgb@itb.ac.id)  
Telp. (022) 2512532

🌐 [fgb.itb.ac.id](http://fgb.itb.ac.id)    [FgbItb](#)    [FGB\\_ITB](#)  
 [@fgbitb\\_1920](#)    [Forum Guru Besar ITB](#)

ISBN 978-623-297-446-3

