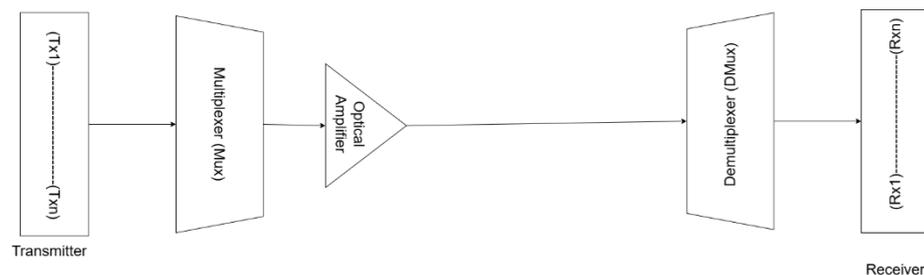


BAB 1

USULAN GAGASAN

1.1. Deskripsi Umum Masalah

Saat ini jaringan fiber optik telah menjadi tulang punggung (*backbone*) infrastruktur telekomunikasi global yang sangat vital, yaitu untuk transmisi data dengan skala kapasitas yang besar, sebagai komponen yang perkembangannya masif untuk jarak yang jauh dan dapat mencakup semua area yang diperlukan. Oleh karena itu peningkatan kebutuhan bandwidth dapat terpenuhi melalui penerapan komunikasi optik atau jaringan sepenuhnya berbasis optik untuk mendukung pertukaran data [1]. Teknologi *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM) adalah solusi utama dalam permasalahan untuk keperluan serat optik yang masif komunikasi hal ini dikarenakan DWDM memungkinkan untuk pemanfaatan panjang gelombang berbeda pada beberapa sinyal optik pada serat tunggal.



Gambar 1.1 Topologi DWDM

Secara umum perangkat DWDM terbagi menjadi empat bagian yang diantaranya yaitu:

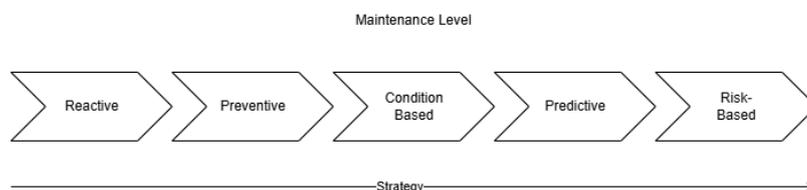
1. *Transponder*: Perangkat yang umumnya terdiri dari *Transmitter* (Tx) yaitu perangkat yang menghasilkan sinyal pada panjang gelombang tertentu serta mentransmisikannya dan *Receiver* (Rx) yaitu perangkat yang berfungsi untuk menerima dan memproses sinyal pada sisi penerima
2. *Multiplexer* (Mux): Perangkat yang menggabungkan dari berbagai panjang gelombang menjadi satu untuk ditransmisikan
3. *Optical Amplifier* (OA): Perangkat yang berfungsi sebagai penguat sinyal selama proses transmisi

4. *Demultiplexer* (DMux): Perangkat yang berfungsi sebagai pemisah sinyal kembali ke panjang gelombang tertentu

Hampir seluruh layanan internet dan komunikasi data bergantung pada jaringan fiber optik untuk mentransmisikan data dalam volume besar dengan kecepatan tinggi. Keandalan sistem fiber optik menjadi krusial mengingat perannya yang sangat fundamental dalam mendukung berbagai aktivitas digital, mulai dari komunikasi sehari-hari hingga operasional bisnis dan layanan publik [1]. Dengan adanya teknologi DWDM dapat membantu sistem komunikasi optik modern untuk mendukung pengiriman data dengan kecepatan tinggi, hal ini dikarenakan DWDM dapat menjangkau jarak antar saluran yang lebih rapat yaitu dibawah 200 GHz dengan meningkatkan kapasitas spektral [2].

Kesehatan layanan DWDM menjadi hal yang penting mengingat menjaga kestabilan dan keberlangsungan dari sistem komunikasi. Namun, kinerja layanan DWDM ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti redaman serat, dispersi, dan non-linearitas, yang dapat menurunkan kualitas sinyal dan menyebabkan kesalahan transmisi. Pemantauan parameter performa seperti *Optical Signal-to-Noise Ratio* (OSNR), *Bit Error Rate* (BER), dan *Forward Error Correction* (FEC), dan *Quality Factor* (Q-factor) menjadi krusial untuk memastikan integritas data dan keandalan jaringan[3].

Saat ini, pendekatan yang umum digunakan adalah di tingkatan *maintenance* secara reaktif dan preventif, di mana perbaikan baru dilakukan setelah terjadi dan teridentifikasi adanya upaya gangguan.



Gambar 1.2 Level Maintenance

Maintenance yang dilakukan oleh industrial saat ini masih secara umum masih terbatas *preventive reactive maintenance* yaitu penggunaan alat deteksi seperti *Optical Spectrum Analyzer* (OSA) yang masih manual dimana hanya mengukur dan menampilkan data tanpa memberikan rekomendasi tindakan lalu para teknisi harus

menganalisis data secara manual [4]. Hal ini karena OSA sendiri terbatas pada pengukuran parameter fisik seperti panjang gelombang, daya optik, OSNR, dan noise yang mana tidak dapat memahami hubungan kompleksitas yang ditimbulkan antara parameter, mendeteksi masalah dan menentukan tindakan yang diperlukan untuk menangani gangguan tersebut.

Selain itu, di DWDM masih menggunakan *maintenance* yang serupa batasannya yaitu penggunaan sistem *monitoring* seperti *Optical Performance monitoring* (OPM) pada jaringan fiber optik seringkali masih menjasi kendala saat ini, karena sistem monitoring yang saat ini terhadap jaringan optik masih terbatas hanya mendeteksi gangguan, memverifikasi gangguan di waktu setelah terdeteksi dengan adanya waktu tunggu, dan memfasilitasi langkah-langkah pemeliharaan yang masih bersifat preventif [5], [6], [7]. Hal ini disebabkan *threshold* yang digunakan sebagai acuan di *monitoring* tidak efisien untuk menentukan kerusakan yang terjadi[8] . penentuan kondisi tidak didasari dari pola kerusakan yang sering muncul dan korelasi antara kondisi kerusakan yang terjadi masih hanya bergantung dari satu parameter yang belum dikaikan secara satu sama lain [9]. Selanjutnya untuk memastikan kerusakan terutama di fiber optiknya maka diperlukan *Optical Time-Domain Reflectometer* (OTDR), namun *Optical Time-Domain Reflectometer* (OTDR) yang sifatnya masih manual dan posisi lokasi kerusakan fiber optik dan hasil deteksi OTDR tidak selalu akurat estimasi jaraknya yaitu 800m dari kerusakan serta bergantung dari proses instalasi dan kalibrasi sebelumnya[10].

Masih sedikit adanya perbaikan yang dapat menyesuaikan di era pertumbuhan jaringan saat ini yang merupakan solusi untuk menyelesaikan permasalahan perbaikan secara reaktif atau preventif.

1.2. Analisis Masalah

Masalah pada DWDM pada jaringan optik dibagi menjadi beberapa aspek, diantaranya :

1.2.1 Aspek Teknologi

Dari perspektif teknologi, kerusakan jaringan optik berbasis DWDM saat ini masih menggunakan *preventive reactive maintenance*. Alat pendeteksi yang digunakan saat ini yaitu *Optical Spectrum Analyzer* (OSA). Alat ini masih

digunakan secara manual yang dimana hanya mengukur dan menampilkan data lalu para teknisi harus menganalisa data secara manual [4]. Selain itu, jaringan optik saat ini juga masih menggunakan *maintenance* menggunakan sistem *monitoring* seperti OPM, alat ini masih terbatas hanya mendeteksi gangguan, menampilkan hasil penilaian dari sistem yang sudah tertanam di perangkat, dan memfasilitasi langkah-langkah pemeliharaan bersifat preventif. Kemudian, alat yang masih umum digunakan pada *maintenance* saat ini adalah menggunakan OTDR sebagai verifikasi lebih lanjut, namun alat ini lebih mendeteksi lokasi kerusakan pada *fiber optic*.

1.2.2 Aspek Sosial

Dari perspektif sosial, gangguan pada sistem *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM) memiliki dampak multidimensional mengingat perannya sebagai infrastruktur kritis transmisi data. Kegagalan teknis seperti degradasi *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) atau *loss power* pada kanal optik tidak hanya sekedar menyebabkan gangguan layanan, tetapi berpotensi memutus rantai komunikasi digital yang menjadi tulang punggung interaksi masyarakat modern. Dampaknya terutama kritis di wilayah dengan ketergantungan tinggi pada konektivitas, seperti:

- Pusat ekonomi digital (e-commerce, fintech) yang mengandalkan latensi rendah
- Wilayah terpencil dengan akses internet terbatas, di mana DWDM mungkin menjadi satu-satunya backbone
- Layanan darurat (telemedisin, koordinasi bencana) yang rentan terhadap disruption

Lebih jauh, gangguan berulang dapat memicu berkurangnya kepercayaan masyarakat terhadap operator telekomunikasi. Fenomena ini tidak hanya berdampak pada keluhan pelanggan (*customer complaint*), tetapi juga berpotensi memicu resistensi terhadap adopsi teknologi digital di tingkat komunitas, terutama pada kelompok masyarakat yang secara tradisional skeptis terhadap transformasi digital.

1.2.3 Aspek Ekonomi

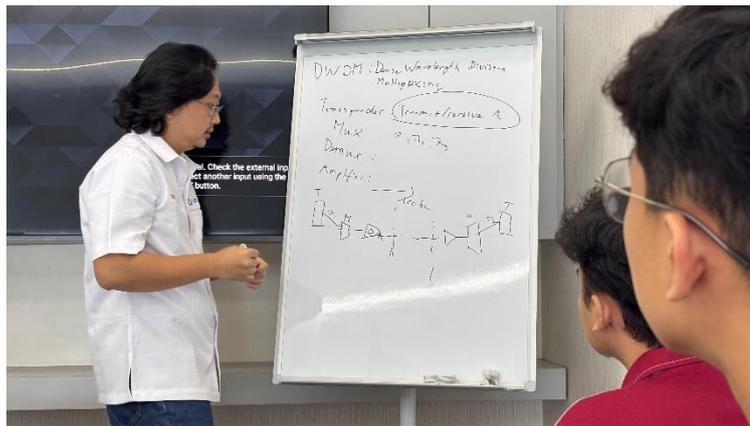
Dari perspektif ekonomi, rendahnya keandalan sistem DWDM berpotensi menimbulkan kerugian finansial signifikan bagi operator telekomunikasi. Setiap kegagalan layanan transmisi data tidak hanya mengganggu kontinuitas operasional, tetapi juga berdampak langsung pada pendapatan melalui dua mekanisme utama: *pertama*, hilangnya pendapatan langsung (*revenue loss*) akibat interupsi layanan berbayar (seperti leased line atau layanan korporat), dan *kedua*, dampak tidak langsung berupa penurunan kepercayaan pelanggan—seperti telah diuraikan pada aspek sosial—yang berpotensi meningkatkan *churn rate* (tingkat migrasi pelanggan ke kompetitor). Dalam industri telekomunikasi yang kompetitif, reputasi sebagai penyedia layanan tidak stabil dapat mengikis *Customer Lifetime Value* (CLV) dalam jangka panjang. Lebih jauh, biaya *recovery* pasca-kegagalan (seperti kompensasi pelanggan atau kampanye pemasaran untuk memulihkan citra) sering kali melebihi biaya investasi dalam pemeliharaan preventif.

1.2.4 Aspek Ketenagakerjaan

Dari perspektif ketenagakerjaan, pendekatan *reactive maintenance* pada sistem DWDM justru menciptakan lingkaran masalah bagi teknisi. Pola kerja ini—yang mengandalkan tindakan perbaikan setelah kerusakan terjadi—tidak hanya membuat teknisi terjebak dalam situasi pasif menunggu, tetapi juga memaksa mereka bekerja dalam tekanan waktu yang tidak realistis ketika gangguan akhirnya muncul. Padahal, mengatasi masalah pada sistem serat optik semacam DWDM bukanlah pekerjaan sederhana. Setiap kerusakan bisa melibatkan rangkaian komponen yang saling terkait, mulai dari transmitter, amplifier, hingga multiplexer, sehingga proses identifikasi akar masalah seringkali berbelit-belit seperti mencari jarum dalam tumpukan jerami. Tanpa adanya pemantauan berkala, teknisi praktis harus memulai diagnosa dari nol, yang secara otomatis memperpanjang durasi perbaikan. Yang lebih parah, pola kerja seperti ini cenderung memicu kelelahan kronis akibat ritme kerja yang tidak terencana—sehari-hari mungkin sepi, tapi begitu ada gangguan, jam kerja bisa molor hingga larut malam.

1.3. Analisis Solusi yang Ada

Hasil wawancara dengan Pa Hardy Lukius selaku perwakilan dari mitra tugas akhir kami yaitu PT. Len Telekomunikasi Indonesia beliau memaparkan bahwa dalam penanganan gangguan pada DWDM, salah satu solusi yang digunakan adalah *Optical Spectrum Analyzer (OSA)*. OSA adalah alat yang digunakan untuk mengukur kerapatan spektral dari sinyal gelombang cahaya pada berbagai panjang gelombang [1].



Gambar 1.3 Wawancara Bersama Pa Hardy

Solusi selanjutnya adalah menggunakan *Optical Performance Monitoring (OPM)*. OPM mengukur sejumlah parameter penting selama transmisi optik, termasuk suhu, *Polarization Mode Dispersion (PMD)*, *Chromatic Dispersion (CD)*, *Forward Error Control (FEC)*, dan *Optical Signal-to-Noise Ratio (OSNR)*, *Bit Error Rate (BER)* [11]. Dalam jaringan komunikasi optik *Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)*, *Optical Performance Monitor (OPM)* dapat memantau indikator-indikator utama misalnya daya optik, panjang gelombang pusat, *bandwidth*, dan rasio *signal-to-noise* optik secara real-time[12].

OPM di PT. Len Telekomunikasi Indonesia selain melihat dari parameter yang penting, juga terdapat indikator alarm yang menandai adanya potensi kerusakan di titik tertentu dan mengidentifikasi jenis kerusakan yang ada berdasarkan jenis alarm yang ada. Namun alarm tersebut jarang sekali dilirik padahal komponen tersebut dapat mengidentifikasi langsung masalahnya, secara keseluruhan dibandingkan semua solusi yang ada utamanya yaitu menggunakan OPM terlebih dahulu untuk melakukan pemantauan kerusakan berdasarkan alarm

dan nilai pengukuran lalu dilanjut menggunakan alat-alat yang dapat dikerjakan di lapangan seperti OTDR.

1.3.1 Keunggulan

Adapun beberapa keunggulan OSA, yaitu:

- Memberikan informasi rinci mengenai berbagai parameter optik seperti OSNR, *crosstalk*, dan lebar pita optik.
- Cocok untuk sistem WDM/DWDM, di mana pengelolaan banyak saluran panjang gelombang secara simultan diperlukan.

Adapun keunggulan OPM, yaitu:

- Mampu menyesuaikan perangkat otomatis, seperti amplifikasi daya pada *optical amplifier* untuk mengimbangi degradasi sinyal.
- Menjamin performa jaringan dengan memastikan daya optik setiap kanal dengan ambang batas.

1.3.2 Kerugian

Adapun kekurangan OSA (*Optical Spectrum Analyzer*), yaitu:

1. Biaya tinggi secara signifikan
 - Harga perangkat berkisar diatas Rp200 juta untuk model high-end
 - Biaya operasional tahunan mencapai 15-20% nilai aset untuk kalibrasi dan maintenance
 - Membutuhkan investasi tambahan untuk software license dan module upgrade
2. Kompleksitas operasional
 - Memerlukan waktu setup 15-30 menit sebelum pengukuran
 - Perlu stabilisasi suhu 10-15 menit untuk hasil akurat
 - Proses pengukuran memakan waktu 2-5 menit per kanal
3. Ketergantungan operator ahli
 - Butuh pelatihan khusus 40-80 jam untuk pengoperasian tepat

- Interpretasi spectrum memerlukan pengalaman 1-2 tahun
 - Risiko kesalahan interpretasi mencapai 25-40% bagi operator pemula
4. Keterbatasan teknis
 - Resolusi terbatas (biasanya 0.05-0.1 nm)
 - Dynamic range maksimal 70-80 dB
 - Tidak bisa mengukur parameter phase/polarization
 - Akurasi menurun pada power level <-50 dBm
 5. Mobilitas terbatas
 - Berat perangkat 10-25 kg
 - Membutuhkan power supply stabil
 - Tidak cocok untuk field measurement di lokasi ekstrim

Adapun kekurangan OPM (Optical Performance Monitoring), yaitu:

1. Masalah akurasi
 - Error measurement ± 0.5 dB untuk power
 - Error ± 0.5 dB untuk OSNR di atas 15 dB
 - Akurasi menurun pada sistem >100 Gbps
2. Masalah interoperability
 - Kendala kompatibilitas multi-vendor
 - Protocol yang proprietary
 - Butuh custom interface untuk integrasi
3. Fungsi prediktif minimal
 - Hanya threshold-based monitoring
 - Tidak ada machine learning capability
 - Tidak support trend analysis jangka panjang
4. Ketergantungan jaringan

- Harus terintegrasi dengan amplifier/ROADM
- Tidak bisa bekerja standalone
- Butuh modifikasi jaringan existing

1.3.3 Keterbatasan

Adapun keterbatasan OSA, yaitu:

- Fokus hanya pada pemantauan parameter optik dan tidak dapat memprediksi potensi gangguan atau kerusakan yang akan datang.
- Kurang optimal untuk jaringan yang sangat besar atau kompleks karena keterbatasan skalabilitas dalam pengolahan data.

Adapun Keterbatasan OPM, yaitu:

- Kurang efektif dalam mendeteksi efek *non-linier* seperti *four-wave mixing* tanpa dukungan alat lain.

1.3.4 Analisis Komparatif

Dalam DWDM, dua solusi utama yang banyak digunakan saat ini adalah OSA dan OPM. Kedua solusi ini memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing dalam hal mendeteksi dan menangani gangguan pada DWDM, berikut analisis komparatif dari enam aspek utama:

- Akurasi

OSA memberikan akurasi tinggi dalam mengukur parameter optik seperti OSNR dan panjang gelombang, sedangkan OPM secara kontinu memonitor kualitas sinyal optik termasuk parameter seperti CD dan PMD. Namun, keduanya terbatas pada pemantauan kondisi jaringan secara reaktif dan kurang efektif dalam mendeteksi pola kerusakan potensial.

Solusi yang akan dirancang berbasis *machine learning* mampu menggabungkan data historis dan *real-time* untuk memprediksi gangguan dengan akurasi tinggi. Dengan analisis berbasis pola, sistem ini dapat mendeteksi anomali sebelum menyebabkan gangguan.

- Efisiensi

OSA dan OPM menawarkan efisiensi dalam pemantauan langsung, namun hanya untuk deteksi gangguan yang telah terjadi. Proses manual dalam analisis data memperlambat pengambilan tindakan.

Solusi *Machine Learning* (ML) yang dirancang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dengan memprediksi potensi gangguan sebelum terjadi, memungkinkan tindakan pencegahan yang lebih proaktif dan pengurangan waktu *downtime* jaringan.

- Konsistensi

Konsistensi hasil pemantauan dipengaruhi oleh kondisi perangkat dan kualitas jaringan. Ketidakstabilan pada parameter optik seperti *noise* dapat memengaruhi keandalan pengukuran.

Solusi ML yang dirancang diharapkan dapat mengatasi variasi ini dengan memanfaatkan model prediksi yang adaptif terhadap perubahan kondisi jaringan.

- Manajemen Data

Data yang dihasilkan oleh OSA dan OPM sering kali terpisah dan sulit dikorelasikan, terutama untuk analisis mendalam tentang gangguan jaringan.

Solusi ML yang dirancang akan menawarkan keunggulan dalam manajemen data karena dapat menggabungkan dan menganalisis data dari berbagai sumber dalam waktu nyata, sehingga memberikan wawasan yang lebih kaya untuk pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat.

- Dokumentasi

Dokumentasi hasil terbatas pada laporan sederhana tentang parameter yang dipantau, tanpa analisis prediktif.

Solusi berbasis ML yang diusulkan akan memberikan dokumentasi yang lebih dinamis dan terus diperbarui, dokumentasi yang dihasilkan mencakup analisis prediktif dan pola gangguan serta memberikan panduan langkah-langkah pencegahan.

- Biaya

OSA dan OPM memerlukan investasi perangkat keras yang tinggi dan biaya operasional yang signifikan, terutama untuk jaringan skala besar.

Solusi ML yang diusulkan akan mengurangi biaya jangka panjang dengan meminimalkan kebutuhan akan perbaikan reaktif dan downtime jaringan, meskipun investasi awal mungkin lebih tinggi karena memerlukan pengolahan data yang kompleks.

- **Keterampilan**

Pengoperasian OSA memerlukan keahlian teknis menengah untuk interpretasi data. Sedangkan interpretasi hasil dari OPM lebih kompleks dan memerlukan pemahaman yang lebih mendalam tentang parameter-parameter optik yang dipantau.

Solusi ML yang diusulkan akan membutuhkan keterampilan tambahan dalam hal pengelolaan data dan algoritma, terutama dalam pelatihan model prediksi. Namun, setelah diterapkan, sistem ini akan lebih otomatis, sehingga meminimalkan keterlibatan manusia dalam pengambilan keputusan.

1.4. Tujuan Tugas Akhir

Penelitian ini bertujuan menciptakan sebuah sistem prediksi berbasis web dengan tingkat akurasi di atas 85% yang secara khusus dirancang untuk memecahkan dua tantangan fundamental dalam perawatan jaringan DWDM dengan memanfaatkan data alarm yang sudah ada bersumber dari OPM yang sudah diintegrasikan ke *Network Management System* (NMS). Lalu melihat dari perspektif sumber daya manusia, pola maintenance reaktif yang selama ini diterapkan telah menciptakan dinamika kerja yang tidak jelas bagi teknisi lapangan. Praktik *troubleshooting* manual yang memakan waktu 4-6 jam per kasus, ditambah jadwal kerja yang tidak terprediksi, secara nyata meningkatkan tingkat stres kerja dan menurunkan produktivitas.

Solusi yang diusulkan melalui platform berbasis web ini akan mengintegrasikan algoritma machine learning mutakhir untuk menganalisis pola historis data jaringan. Sistem ini tidak hanya mampu memprediksi potensi gangguan sebelum terjadi dengan akurasi tinggi sesuai waktu, tetapi juga menyajikan informasi melalui antarmuka visual yang intuitif. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat terjadi transformasi signifikan dalam pola kerja tim perbaikan dari yang semula reaktif dan bergantung pada keahlian individu, menjadi lebih

terencana dan berbasis data. Pada akhirnya, inovasi ini diharapkan dapat mengoptimalkan alokasi tenaga kerja sekaligus menekan biaya operasional yang selama ini menjadi beban operator telekomunikasi.

1.5. Batasan Tugas Akhir

Berdasarkan analisis mendalam terhadap permasalahan maintenance jaringan DWDM yang diuraikan pada Bab 1, penelitian ini membatasi ruang lingkup pengembangan sistem prediksi berbasis web sebagai berikut:

1. Cakupan Parameter Monitoring

- Sistem hanya memproses parameter-parameter kunci DWDM yang tersedia dari NMS alarm PT. LTI berdasarkan alarm yang dihasilkan perangkat
- Hasil prediksi Alarm diperoleh dari data mingguan dan memprediksi sekitar satu minggu kedepan

2. Sumber Data dan Integrasi

- Menggunakan dataset historis alarm dari OPM PT. Len Telekomunikasi Indonesia (LTI)
- Tidak melakukan integrasi langsung dengan perangkat jaringan real-time karena sistem bersifat *offline prediction*. Karena di latih dan diuji berdasarkan data historis

3. Kompleksitas Model Machine Learning

- Fokus pada algoritma *Deep Learning* seperti *Long Short-Term Memory* (LSTM) karena di data tersebut terdapat fitur waktu yang memungkinkan untuk dibuat model *time-series based*. Berdasarkan data yang ada

4. Fitur Web Platform

- Menyediakan visualisasi trend parameter dan prediksi gangguan 24-72 jam ke depan

- Tidak termasuk fungsi control langsung ke perangkat jaringan (hanya rekomendasi maintenance)

5. Evaluasi Kinerja

- Untuk *Machine Learning*, penilaian berdasarkan besar kecilnya akurasi dari sisi klasifikasi dan sisi regresi. Dari sisi klasifikasi secara keseluruhan metrik yang dijelaskan di bab 4 harus lebih nilai lebih dari 80% dan untuk regresi harus mempunyai nilai yang dibawah 50%
- Testing terbatas pada data historis tanpa uji lapangan real-time.