

Hak Cipta:

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Tinjauan terhadap penelitian-penelitian terdahulu sangat diperlukan sebagai landasan teori, komparasi, serta pijakan dalam menentukan arah pengembangan sistem yang dirancang. Melalui kajian pustaka ini, dapat dipetakan posisi penelitian yang dilakukan oleh penulis di antara riset-riset sejenis yang telah dipublikasikan sebelumnya, khususnya yang berkaitan dengan sistem *interlock* gardu induk, pemrograman *Programmable Logic Controller* (PLC), dan implementasi *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA)

2.2 Landasan Teori Perancangan Sistem Kontrol Interlock

Ide untuk merancang dan menerapkan simulasi sistem pengunci elektrik (*interlock*) menggunakan *Programmable Logic Controller* (PLC) muncul karena sebuah teori dasar. Menurut (Tobing, 2021). Pemahaman tentang keselamatan operasi gardu induk sangat bergantung pada cara kita mencegah salah operasi oleh petugas (*human error*) saat manuver. Secara teori, urutan membuka dan menutup sakelar besar—yaitu Pemutus Tenaga (PMT) dan Pemisah (PMS)—punya aturan ketat yang tidak boleh dilanggar. PMS sama sekali tidak boleh dibuka atau ditutup jika PMT masih dalam posisi terhubung dan mengalirkan listrik, karena bisa memicu ledakan percikan api (*arcing*) yang merusak alat dan membahayakan keselamatan.

Untuk mensimulasikan kondisi tersebut dalam skala laboratorium kampus, menurut (Dinata et al., 2021). Muncul gagasan untuk memanfaatkan kecerdasan program PLC melalui instruksi khusus bernama *Interlock* (IL) dan *Interlock Clear* (ILC). Lewat program berbentuk diagram tangga (*Ladder Diagram*) pada alat peraga ini, posisi simulasi PMT dan PMS dibaca oleh PLC dalam hitungan seperseribu detik. Jika mahasiswa atau praktikan tidak sengaja menekan tombol operasi yang salah atau tidak sesuai urutan aman, sistem IL-ILC pada PLC ini akan langsung mengunci dan memutus aliran perintah tersebut secara otomatis (*fail-safe*). Pembuatan sistem kendali digital ini



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

didasari oleh kebutuhan penyediaan media pembelajaran interaktif yang aman dikampus, sehingga mahasiswa dapat memahami logika proteksi dan pelacakan gangguan pada instalasi tegangan tinggi tanpa risiko fisik yang berbahaya

2.2.1 Urutan Manuver dan Logika Operasi PMT - PMS

Menurut (Nurhuda, 2018). Dalam sistem penyaluran tenaga listrik, operasi pensaklaran (manuver) pada Gardu Induk harus mengikuti prosedur operasi standar (SOP) yang ketat untuk menghindari terjadinya kecelakaan kerja maupun kerusakan fatal pada peralatan. Komponen utama yang terlibat dalam manuver ini adalah Pemutus Tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* (CB) dan Pemisah (PMS) atau *Disconnecting Switch* (DS).

Secara teoritis, PMS tidak dirancang untuk memutus arus beban, melainkan hanya untuk mengisolasi tegangan pada kondisi tanpa beban. Oleh karena itu, hubungan logis yang harus dijaga oleh sistem interlock adalah sebagai berikut:

- Prosedur Pelepasan Beban (Mematikan Aliran): PMT harus dibuka (*OPEN*) terlebih dahulu hingga arus benar-benar putus, baru kemudian PMS Busbar dan PMS Line boleh dibuka.
- Prosedur Pemberian Beban (Menyalakan Aliran): PMS Busbar dan PMS Line harus ditutup (*CLOSE*) terlebih dahulu dalam kondisi tanpa beban, baru kemudian PMT boleh ditutup untuk mengalirkan arus.

2.2.2 Konsep Instruksi Interlock (IL) dan Interlock Clear (ILC) pada PLC

(Omron Electronic, 2019). menyatakan Pada perancangan berbasis PLC (misalnya pada arsitektur OMRON atau sejenisnya), penguncian logika secara *software* dilakukan menggunakan pasangan instruksi Interlock (IL) dan Interlock Clear (ILC).

Cara kerja kedua instruksi ini dalam diagram tangga (*Ladder Diagram*) adalah sebagai berikut:

- Kondisi IL Aktif (Urutan Benar): Jika syarat interlock (misalkan status PMT adalah *OPEN*) terpenuhi, maka instruksi IL akan melewatkan arus logika.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Semua program atau instruksi yang berada di antara IL dan ILC akan dieksekusi secara normal sesuai input dari tombol operasi.

- Kondisi IL Non-Aktif (Urutan Salah): Jika syarat interlock tidak terpenuhi (misalkan PMT masih *CLOSE* tetapi ada perintah membuka PMS), maka instruksi IL akan memutus seluruh aliran logika di blok tersebut. Akibatnya, semua output (koil) yang berada di antara IL dan ILC secara otomatis akan dipaksa bernilai 0 (*OFF / fail-safe*), tidak peduli seberapa sering tombol operasi ditekan oleh praktikan.

2.2.3 Prinsip Kerja *Fail-Safe* pada Alat Peraga Laboratorium

Penerapan sistem *interlock* pada alat peraga laboratorium mengadopsi prinsip *fail-safe design*. Prinsip ini menyatakan bahwa jika terjadi kegagalan sistem, kesalahan input, atau hilangnya daya kontrol, maka sistem harus secara otomatis mengarah pada kondisi yang paling aman bagi pengguna dan perangkat.

Melalui pemrograman PLC yang responsif (memiliki waktu siklus/*scan time* dalam milidetik), alat peraga ini mampu mensimulasikan kegagalan operasi secara visual (misalnya melalui indikator lampu atau alarm gangguan) tanpa menimbulkan risiko fisik. Hal ini memberikan ruang bagi mahasiswa untuk melakukan pelacakan gangguan (*troubleshooting*) logika proteksi secara interaktif, aman, dan representatif dengan kondisi Gardu Induk yang sebenarnya.

2.3 Komponen Utama dan Karakteristik Perangkat PLC

(Omron, 2019) menyatakan *Programmable Logic Controller* (PLC), PLC yang digunakan dalam penelitian ini adalah Omron CP2E-N40DR-A, yang merupakan PLC compact dari seri CP2E secara sederhana adalah sebuah komputer digital khusus industri yang dirancang untuk mengendalikan proses otomatisasi secara terus-menerus. Tidak seperti komputer biasa, PLC dibuat sangat tangguh agar tahan terhadap gangguan listrik (*noise*) dan fluktuasi suhu yang sering terjadi di lingkungan kerja teknik. Di dalam lingkungan laboratorium kampus, PLC bertindak sebagai "otak" utama yang menjembatani antara panel simulasi kontrol operator dengan maket atau miniatur peralatan gardu induk yang dikendalikan. Visualisasi fisik dari

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2.3.1 Prinsip Kerja dan Siklus Pindai PLC

Inputs): PLC memeriksa status fisik seluruh input yang terdapat pada panel simulasi.

- Membaca Input (*Read Inputs*): PLC memeriksa status fisik seluruh perangkat input yang terhubung pada panel simulasi.
- Mengeksekusi Program (*Execute Program*): CPU memproses data input tersebut berdasarkan baris-baris logika *interlock* yang telah dibuat oleh mahasiswa di dalam memori PLC.
- Memperbarui Output (*Update Outputs*): PLC mengirimkan sinyal hasil keputusan program untuk mengubah kondisi perangkat output di lapangan (Petruzzella, 2016).

Kecepatan respons yang sangat tinggi inilah yang mendasari mengapa PLC dipilih sebagai media pembelajaran yang ideal, sehingga mahasiswa dapat melihat bagaimana salah operasi langsung direspons oleh sistem dalam waktu sekejap tanpa adanya jeda waktu (*delay*).



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2.3.2 Arsitektur Perangkat Keras PLC

Menurut (Kusuma et al., 2024). untuk dapat menjalankan fungsinya sebagai alat peraga pembelajaran, perangkat keras PLC dibagi menjadi tiga kompartemen penting:

- Modul Input: Berfungsi sebagai "indra" bagi PLC untuk menerima sinyal luar, seperti sakelar pembatas (*limit switch*), tombol tekan (*push button*), atau sakelar miniatur PMT/PMS pada panel praktikum.
- Central Processing Unit (CPU): Merupakan pusat pemroses atau "otak" yang bertugas menyimpan program, melakukan perhitungan logika matematika, dan mengontrol komunikasi data antar-modul.
- Modul Output: Berfungsi sebagai "tangan" bagi PLC untuk mengirimkan sinyal perintah hasil pemrosesan CPU menuju komponen beban eksternal pada alat peraga.

2.3.3 Integrasi Relai Bantu (*Auxiliary Relay*) Eksternal

Untuk mengatasi keterbatasan kapasitas arus dan jumlah terminal keluaran (*output*) digital pada PLC, digunakan komponen perantara berupa relai bantu (*auxiliary relay*). Komponen ini berfungsi menjembatani sinyal kendali berdaya rendah dari CPU PLC menuju rangkaian penggerak mekanis PMT atau DS yang membutuhkan daya lebih besar.

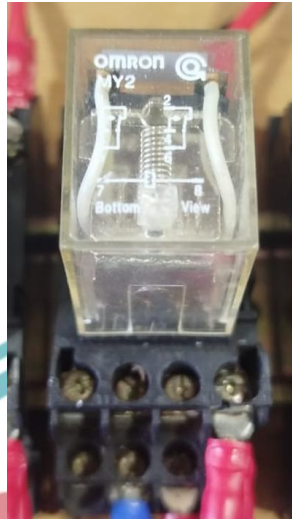
Salah satu tipe yang diintegrasikan ke dalam panel simulator ini adalah relai elektromagnetik Omron MY2. Selain berfungsi sebagai isolasi galvanis untuk melindungi sirkuit internal PLC dari arus transien, perangkat ini juga digunakan sebagai ekspansi kontak *Normally Open* (NO) dan *Normally Close* (NC) untuk kebutuhan logika pengunci tambahan di alat. Visualisasi bentuk fisik dan arsitektur pin internal dari relai bantu Omron MY2 ditunjukkan pada Gambar 2.2 berikut.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 2. 2 Relay Omron MY2 220/240 VAC

Menurut (Omron Electronic, 2017). Untuk dapat menjalankan fungsinya sebagai alat peraga pembelajaran, perangkat keras PLC dibagi menjadi tiga kompartemen penting:

- Efisiensi Output PLC: Satu sinyal dari pin *output* PLC cukup digunakan untuk memicu satu koil relai bantu, sehingga mampu menghemat penggunaan pin *output* PLC yang jumlahnya terbatas dan berbiaya mahal.
- Penyediaan Kontak NO dan NC Tambahan: Relai bantu menyediakan sakelar mekanis internal berbentuk kontak *Normally Open* (NO) dan *Normally Close* (NC) yang dapat dipasang secara fleksibel untuk keperluan logika pengunci tambahan.
- Pengatur Lampu Indikator Status: Kontak NO dan NC dari relai bantu ini dimanfaatkan secara langsung untuk mengatur nyala-mati lampu indikator (*pilot lamp*) guna menunjukkan status posisi *Open* (terbuka) dan *Close* (tertutup) dari PMT dan PMS simulasi.

2.4 Teori Pemrograman Logika Menggunakan Instruksi IL dan ILC

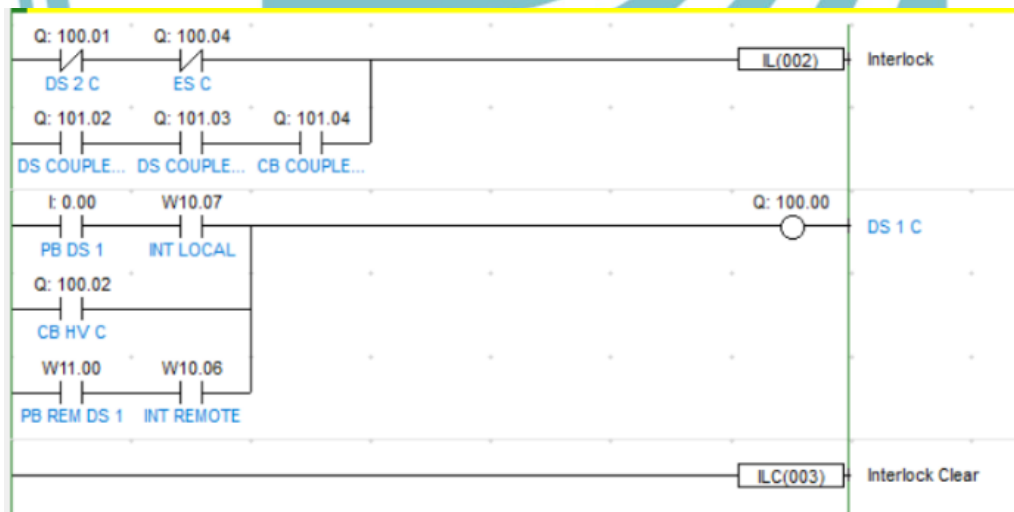


© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Penerapan instruksi khusus *Interlock* (IL) dan *Interlock Clear* (ILC) dalam pemrograman *Ladder Diagram* didasari oleh teori kendali kondisional, di mana sekelompok baris perintah program dapat diisolasi atau dinonaktifkan secara bersamaan berdasarkan satu syarat keamanan utama. Menurut (Hidayat Arief & Yuningtyastuti, 2012). Fungsi IL bekerja sebagai gerbang logika pembuka blok program, yang berarti seluruh baris instruksi diagram tangga yang terletak di antara instruksi IL dan ILC hanya akan diproses oleh CPU PLC jika kondisi syarat *interlock* bernilai benar (*true*). Jika mahasiswa atau praktikan mencoba memberikan perintah manuver melalui panel kontrol simulasi saat syarat urutan aman antara PMT dan PMS tidak terpenuhi, maka instruksi IL secara otomatis akan langsung memutus aliran logika pada seluruh program di dalam areanya dan memaksa semua modul *output* yang terkait ke posisi mati (*off*). Penerapan logika isolasi blok program ini diilustrasikan melalui skema *Ladder Diagram* pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Instruksi Function IL dan ILC



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB III

PERENCANAAN DAN REASLISASI

3.1 Rancangan Alat

Perancangan alat peraga simulator sistem *interlock* berbasis PLC ini dilakukan untuk menguji coba keandalan serta memvisualisasikan logika penguncian digital pada gardu induk secara aman. Melalui perancangan ini, dibuat sebuah sistem kontrol terintegrasi yang mampu menyimulasikan urutan manuver pengoperasian Pemutus Tenaga (PMT) dan Pemisah (PMS).

Poin penekanan utama pada perancangan ini terletak pada dua aspek, yaitu simplisitas sistem elektrikal berbasis full AC 220V dan fungsinya sebagai *trainer kit* media pembelajaran mahasiswa. 1. Karakteristik PLC AC: Arsitektur kendali murni mengimplementasikan sumber tegangan AC 220V. Berbeda dengan kontrol gardu induk konvensional yang membutuhkan catu daya DC eksternal (*rectifier* dan *battery bank*) yang rumit, simulator ini dirancang agar seluruh pemrosesan—mulai dari suplai internal PLC, pembacaan kontak masukan lapangan, hingga penggerakan relai bantu keluaran—bekerja langsung pada level tegangan AC 220V. 2. Fungsi Media Pembelajaran: Alat ini didesain secara khusus sebagai perangkat *trainer kit* interaktif untuk mahasiswa teknik elektro. Tujuannya adalah memberikan pengalaman praktis (*hands-on*) bagi mahasiswa agar dapat mengenal, memahami, dan mempraktikkan prosedur manuver *interlock* Gardu Induk secara langsung dan aman tanpa risiko bahaya tegangan ekstra tinggi.

Secara umum, tahapan perancangan alat ini dibagi menjadi beberapa bagian utama sebagai berikut:

3.1.1 Deskripsi Alat

Penelitian ini mengadopsi pendekatan metode eksperimental dengan tahapan perancangan, implementasi, dan pengujian. *Trainer kit* sistem *interlock* gardu induk 150/20 kV adalah sebuah perangkat pembelajaran berbasis hardware yang merepresentasikan konfigurasi operasional tiga bay gardu induk secara simultan dalam

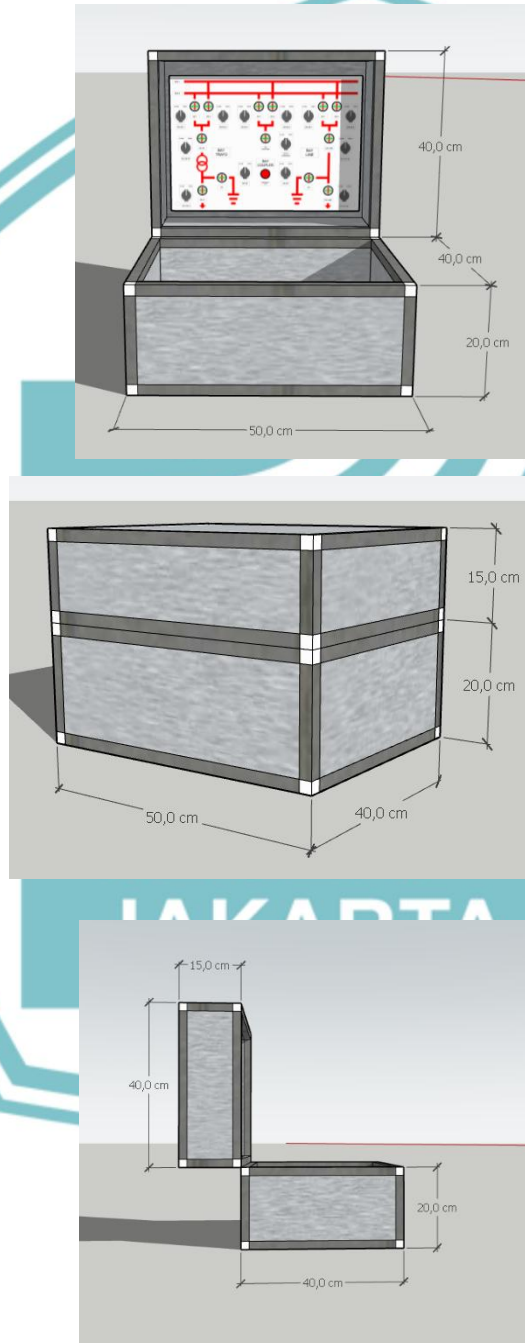


© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

satu unit portabel. Alat ini terdiri dari dua subsistem yang terintegrasi: subsistem hardware berupa panel kontrol fisik dalam kotak portabel, dan subsistem software berupa antarmuka SCADA/HMI yang berjalan pada laptop. Visualisasi hasil perancangan struktur mekanis dan tata letak panel dari kotak portabel tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Perancangan Kotak Trainer Kit



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Menurut datasheet Omron (Omron Electronic, 2019). Subsistem hardware berpusat pada PLC Omron CP2E-N40DR-A sebagai kontroler utama yang membaca input dan mengendalikan output. Komponen pendukungnya meliputi modul relay Omron MY (Omron Electronic, 2017), untuk simulasi PMT/PMS/ES, pilot lamp dua posisi (merah dan hijau) sebagai indikator status, selector switch untuk operasi manual, MCB dan sakelar darurat sebagai pengaman, serta terminal blok untuk koneksi kabel. Menurut (Dinata, 2018). Laptop berfungsi sebagai master SCADA/HMI yang terhubung ke PLC, menampilkan representasi digital dari seluruh peralatan switching dalam bentuk single-line diagram animasi.

3.1.2 Cara Kerja Alat

Cara kerja *Trainer Kit* secara keseluruhan dapat dijelaskan melalui dua mode operasi:

Mode Operasi Local (melalui *selector switch* pada panel):

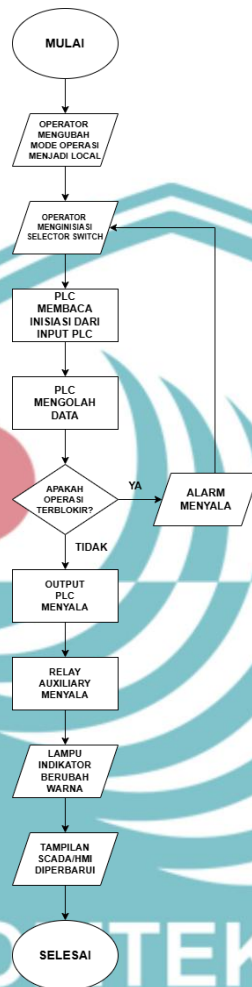
1. Operator memutar *selector switch* pada panel untuk memberikan perintah operasi
2. Menurut *datasheet* Omron CP2E (Omron Electronic, 2019). PLC membaca perubahan sinyal *input* pada terminal I/O dalam siklus scan cycle yang berlangsung terus-menerus
3. Program *Ladder Diagram* pada PLC mengevaluasi seluruh kondisi *Interlock* yang relevan berdasarkan status semua peralatan saat itu, menggunakan logika *AND*, *OR*, dan *NOT* sebagaimana ditetapkan IEC 61131-3 ((IEC), 2009).
4. Jika semua kondisi prasyarat terpenuhi (*Permissive*) atau aman: PLC mengaktifkan *output relay* → *relay* bekerja → lampu indikator merah menyala (indikasi peralatan tutup).
5. Jika ada kondisi prasyarat yang tidak terpenuhi (*Inhibit*) atau tidak aman: PLC memblokir operasi → operasi tidak terealisasi → *output* alarm aktif
6. Secara bersamaan, PLC mengirimkan update status seluruh I/O ke laptop via Ethernet menggunakan protokol Modbus TCP/IP (Kumar et al., 2023).
7. CX-Supervisor pada laptop menerima update data dan memperbarui tampilan *single-Line* diagram secara real-time



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 3. 2 Flowchart Cara Kerja Sistem Local

Mode Operasi Remote (melalui SCADA/HMI pada laptop):

1. Operator mengklik simbol peralatan pada *single-Line* diagram di antarmuka CX-Supervisor
2. CX-Supervisor mengirimkan perintah kontrol ke PLC melalui jalur komunikasi yang telah dikonfigurasi
3. PLC menerima perintah dan mengevaluasi kondisi *Interlock*
4. Proses selanjutnya identik dengan mode manual

Cara kerja sistem *remote* bisa dilihat pada gambar 3.3 berikut.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 3. 3 Flowchart Cara Kerja Sistem Remote

3.1.3 Spesifikasi Alat

Spesifikasi teknis komponen-komponen utama yang digunakan dalam perancangan dan realisasi trainer kit sistem monitoring dan pengendalian operasi gardu induk ini pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3. 1 Spesifikasi Alat

Parameter	Spesifikasi
Dimensi kotak	50 × 40 × 35 cm (P × L × T)
Berat total	±13 kg
PLC	Omron CP2E-N40DR-A
Jumlah input PLC yang digunakan	14
Jumlah output PLC yang digunakan	13
Jumlah selector switch	14
Jumlah pilot lamp	13
Jumlah relay	13 (Tipe Omron MY2N)
Tegangan kerja sistem	AC 220V (supply) / DC 24V (I/O PLC)



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Parameter	Spesifikasi
Jenis kabel wiring internal	NYAF 1×1,5 mm (daya) dan NYAF 1×0,75 mm (kontrol)
Media komunikasi PLC–Laptop	Kabel LAN, Ethernet 100BASE-TX
Protokol komunikasi	Modbus TCP/IP
Waktu respons sistem	>0,2ms
Software PLC	CX-Programmer v9.7 (Omron)
Software SCADA/HMI	CX-Supervisor (Omron)
Bay yang direpresentasikan	Bay Trafo, Bay Coupler, Bay Line
Jumlah rung Ladder Diagram	3 Section dan 71 Rung
Jumlah skenario pengujian	42 Skenario

Semua komponen perangkat keras (*hardware*) yang digunakan pada alat peraga ini dipilih berdasarkan rating tegangan arus bolak-balik (AC 220V) agar sesuai dengan desain sistem tanpa catu daya DC luar. Spesifikasi utamanya meliputi:

- PLC Tipe *Compact*: Menggunakan catu daya AC 100-240V dengan tipe output *Relay* yang kuat menahan beban AC 220V / 2 Ampere.
- Komponen Antarmuka Panel: Sakelar selektor jenis *stay-put* (menetap) 2 posisi dan lampu indikator (*pilot lamp*) tipe industrial berdiameter 22 mm bertegangan AC 220V.
- Relai Bantu (*Auxiliary Relay*): Kontak bantu eksternal dengan tegangan kerja koil AC 220V sebagai pengaman tambahan.

Sebagai bagian inti dari sistem otomasi ini, hubungan fisik antara sakelar/lampu di panel dengan nomor terminal di dalam program PLC diatur melalui daftar pengalamatan (*Addressing*) Bay Trafo pada Tabel 3.2 berikut:

Tabel 3. 2 Spesifikasi I/O PLC Bay Trafo

Tipe I/O	Nama Komponen pada Panel Mimic	Alamat Memori PLC	Tegangan Kerja	Fungsi Komponen
INPUT	Sakelar Selektor PMS Trafo (SS DS 1 Trafo)	I:0.00	AC 220 V	Mengirim perintah buka/tutup PMS 1 Trafo ke PLC



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

	Sakelar Selektor PMS Trafo (SS DS 2 Trafo)	I:0.01	AC 220 V	Mengirim perintah buka/tutup PMS 1 Trafo ke PLC
	Sakelar Selektor PMT Trafo (SS CB HV Trafo)	I:0.02	AC 220 V	Mengirim perintah buka/tutup PMT HV Trafo ke PLC
	Sakelar Selektor PMT Trafo (SS CB LV Trafo)	I:0.03	AC 220 V	Mengirim perintah buka/tutup PMT LV Trafo ke PLC
	Sakelar Selektor ES Trafo (SS ES Trafo)	I:0.04	AC 220 V	Mengirim perintah buka/tutup ES Trafo ke PLC
	Sakelar Selektor <i>Local-Remote</i>	I:0.05	AC 220 V	Pengatur hak akses untuk mengoperasikan peralatan, operasi langsung (Local), operasi lewat SCADA (Remote)
OUTPUT	Lampu Indikator PMS 1 Trafo <i>Close</i>	Q:100.00	AC 220 V	Lampu merah penanda PMS 1 Trafo posisi masuk
	Lampu Indikator PMS 1 Trafo <i>Open</i>	W10.01	AC 220 V	Lampu merah penanda PMS 1 Trafo posisi lepas
	Lampu Indikator PMS 2 Trafo <i>Close</i>	Q:100.01	AC 220 V	Lampu merah penanda PMS 2 Trafo posisi masuk
	Lampu Indikator PMS 2 Trafo <i>Open</i>	W10.02	AC 220 V	Lampu merah penanda PMS 2 Trafo posisi lepas



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampu Indikator PMT HV Trafo <i>Close</i>	Q:100.02	AC 220 V	Lampu merah penanda PMT HV Trafo posisi masuk
Lampu Indikator PMT HV Trafo <i>Open</i>	W10.03	AC 220 V	Lampu merah penanda PMT HV Trafo posisi lepas
Lampu Indikator PMT LV Trafo <i>Close</i>	Q:100.03	AC 220 V	Lampu merah penanda PMT LV Trafo posisi masuk
Lampu Indikator PMT LV Trafo <i>Open</i>	W10.04	AC 220 V	Lampu merah penanda PMT LV Trafo posisi lepas
Lampu Indikator ES Trafo <i>Close</i>	Q:100.04	AC 220 V	Lampu merah penanda PMT LV Trafo posisi masuk
Lampu Indikator ES Trafo <i>Open</i>	W10.05	AC 220 V	Lampu merah penanda PMT LV Trafo posisi lepas

Implementasi pengalaman data dan spesifikasi elektrik pada komponen *Bay Line* dirangkum dalam Tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Spesifikasi I/O PLC Bay Line

Tipe I/O	Nama Komponen pada Panel Mimic	Alamat Memori PLC	Tegangan Kerja	Fungsi Komponen
INPUT	Sakelar Selektor PMS 1 Bus (SS DS 1 Line)	I:0.06	AC 220 V	Mengirim perintah buka/tutup PMS 1 Line ke PLC
	Sakelar Selektor PMS 2 Bus (SS DS 2 line)	I:0.07	AC 220 V	Mengirim perintah buka/tutup PMS 2 Line ke PLC



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

	Sakelar Selektor PMT Line (SS CB Line)	I:0.08	AC 220 V	Mengirim perintah buka/tutup PMT Line ke PLC
	Sakelar Selektor PMS Line (SS DS Line)	I:0.09	AC 220 V	Mengirim perintah buka/tutup PMS Line Trafo ke PLC
	Sakelar Selektor ES Line (SS ES)	I:0.10	AC 220 V	Mengirim perintah buka/tutup ES Line ke PLC
OUTPUT	Lampu Indikator PMS 1 Bus Line <i>Close</i>	Q:100.05	AC 220 V	Lampu merah penanda PMS 1 Bus Line posisi masuk
	Lampu Indikator PMS 1 Bus Line <i>Open</i>	W14.00	AC 220 V	Lampu merah penanda PMS 1 Bus Line posisi keluar
	Lampu Indikator PMS 2 Bus Line <i>Close</i>	Q:100.06	AC 220 V	Lampu merah penanda PMS 2 Bus Line posisi masuk
	Lampu Indikator PMS 2 Bus Line <i>Open</i>	W14.01	AC 220 V	Lampu merah penanda PMS 2 Bus Line posisi lepas
	Lampu Indikator PMT Line <i>Close</i>	Q:100.07	AC 220 V	Lampu merah penanda PMT Line posisi masuk
	Lampu Indikator PMT Line <i>Open</i>	W14.02	AC 220 V	Lampu merah penanda PMT Line posisi lepas
	Lampu Indikator PMS Line <i>Close</i>	Q:101.00	AC 220 V	Lampu merah penanda PMS Line posisi masuk



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampu Indikator PMS Line <i>Open</i>	W14.03	AC 220 V	Lampu penanda PMS Line posisi keluar	merah
Lampu Indikator ES Line <i>Close</i>	Q:101.01	AC 220 V	Lampu penanda ES Line posisi masuk	merah
Lampu Indikator ES Line <i>Open</i>	W14.04	AC 220 V	Lampu penanda ES Line posisi lepas	merah

3.1.4 Diagram Blok

Gambar 3.4 Diagram Blok Sistem menunjukkan alur kerja kontrol yang terbagi menjadi bagian *input*, proses, dan *output*. Pada bagian *input*, perintah dapat diberikan secara *remote* melalui laptop yang terhubung ke sistem SCADA, maupun secara lokal menggunakan *selector switch* sebagai input manual. Data dari SCADA dikirim melalui jaringan komunikasi, sedangkan *selector switch* mengirimkan sinyal elektrik langsung ke PLC Omron CP2E selaku pengendali utama.

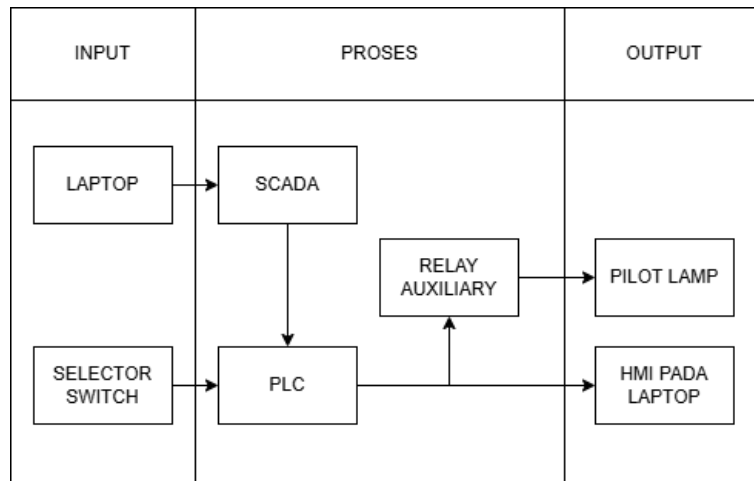
Pada bagian proses, PLC mengeksekusi logika *interlock* untuk memastikan keamanan manuver sebelum mengirimkan perintah ke bagian *output* (simulasi PMT dan PMS). Selain itu, status *output* ini dikirimkan kembali ke SCADA sebagai sinyal balik (*feedback*) agar operator dapat memonitor kondisi sistem secara *real-time*. Penjelasan visual mengenai interkoneksi ini dapat dilihat pada Gambar 3.4



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 3. 4 Blok Diagram Aliran Data

Pada bagian proses, PLC memproses seluruh sinyal *input* berdasarkan logika kontrol yang telah diprogram. PLC menentukan kondisi keluaran sesuai dengan perintah yang diterima dan status sistem lalu diteruskan ke *Relay Auxiliary* yang terhubung dengan lampu sebagai *output*.

Pada bagian *output*, hasil pemrosesan PLC ditampilkan melalui lampu indikator sebagai indikator visual dan HMI pada Laptop. lampu indikator dan HMI menunjukkan status operasi sistem, sehingga pengguna dapat mengetahui kondisi kerja sistem secara langsung.

3.1.5 Wiring Diagram

a. Wiring Diagram Supply Tegangan

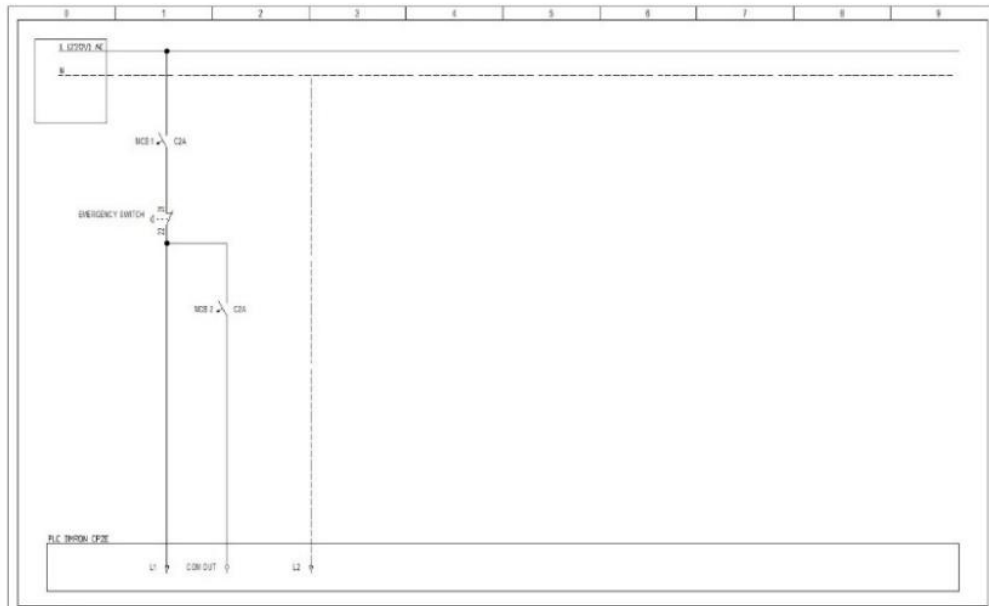
Untuk menjamin keamanan dan ketepatan interkoneksi kabel pada sistem suplai daya alat peraga, diperlukan sebuah panduan skematik yang baku. Gambar 3.5 menyajikan rancangan *wiring diagram supply* tegangan yang digunakan sebagai acuan dalam proses perakitan perangkat keras kontrol.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 3. 5 Wiring Diagram Supply Tegangan

b. Wiring Diagram Input PLC

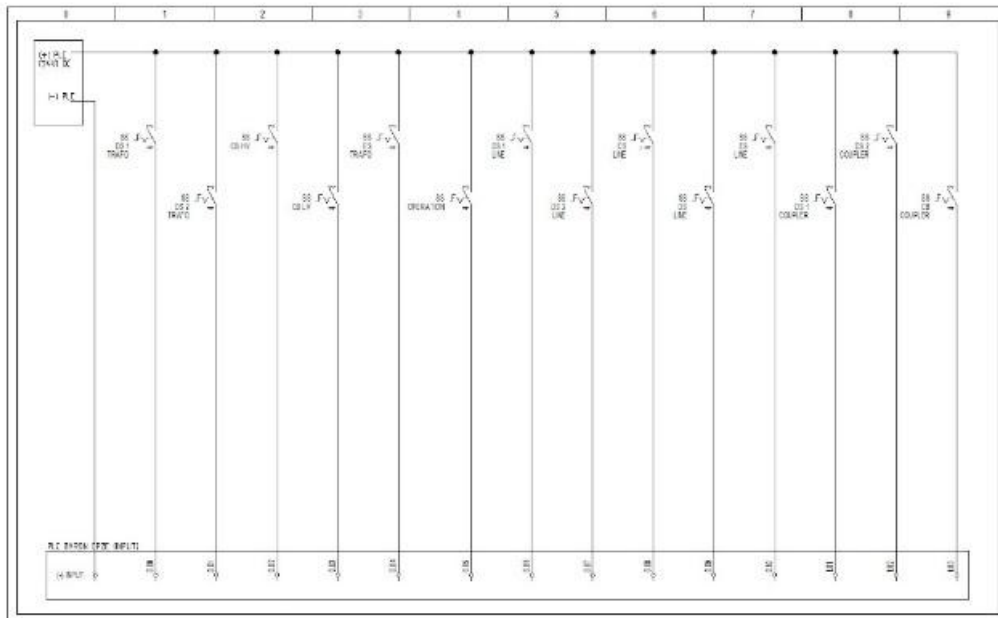
Rancangan konfigurasi *wiring* diagram pada Gambar 3.6 mengilustrasikan pengkabelan tipe *Sinking Input* pada PLC Omron CP1E, di mana kutub positif (+) dari catu daya 24 VDC didistribusikan ke seluruh sakelar simulasi, sedangkan kutub negatif (-) dihubungkan langsung ke terminal *Common* (COM). Komponen sakelar yang digunakan meliputi serangkaian *Disconnecting Switch* (DS)—seperti kontrol trafo, jalur transmisi, dan kopler—yang sisi keluarannya dihubungkan secara independen ke alamat input digital PLC mulai dari terminal 0.00 hingga 0.11. Ketika salah satu sakelar diaktifkan hingga kontaknya tertutup, arus listrik akan mengalir menuju terminal input PLC untuk mengaktifkan *optocoupler* internal, sehingga status bit memori berubah dari 0 menjadi 1 untuk selanjutnya dieksekusi oleh program *Ladder Diagram*.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 3. 6 Wiring Diagram Input PLC

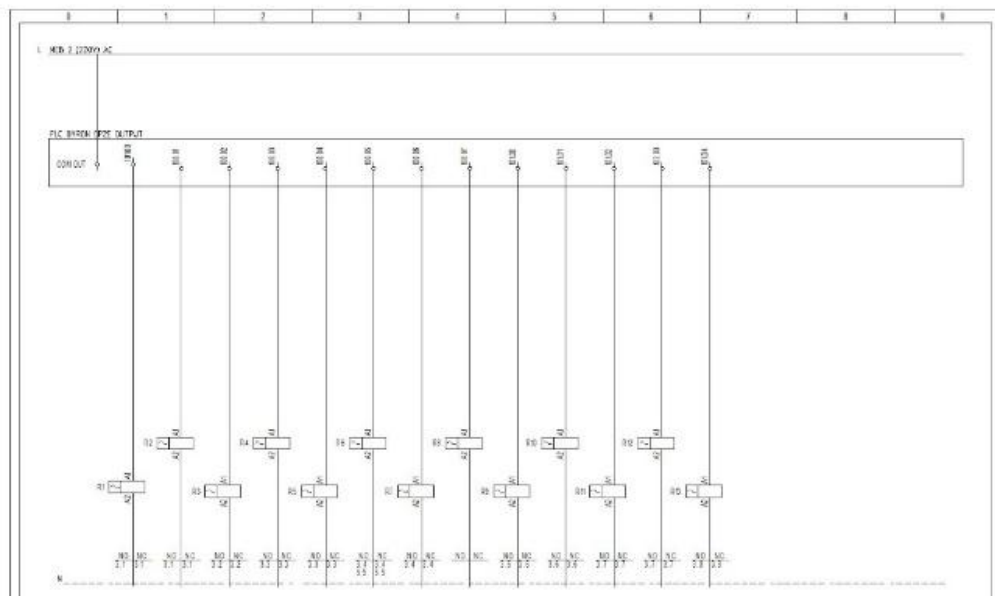
- c. Wiring Diagram Output PLC
 - Rancangan konfigurasi *wiring diagram* pada Gambar 3.7 mengilustrasikan interkoneksi sirkuit daya antara modul keluaran PLC Omron CP1E dengan serangkaian relai eksternal (R1 hingga R13) yang berfungsi sebagai interkoneksi beban. Penggunaan relai eksternal ini bertujuan sebagai isolasi elektrik guna melindungi modul output PLC dari bahaya arus balik (*back-EMF*) atau beban berlebih (*overload*) yang dipicu oleh perangkat di lapangan. Melalui skema ini, terlihat jelas bagaimana tegangan kendali dari PLC mengaktifkan koil relai, yang kemudian secara aman mengalirkan daya utama menuju beban aktual pada panel simulasi. menuju beban aktual pada panel simulasi. Selain itu, gambar skematik ini juga memperlihatkan pembagian grup terminal *common* pada modul *output* PLC, yang dirancang sedemikian rupa untuk memisahkan jalur pengabelan berdasarkan kelompok beban relai. Dengan adanya representasi visual mengenai penomoran pin koil relai dan pemetaan alamat I/O yang terstruktur.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

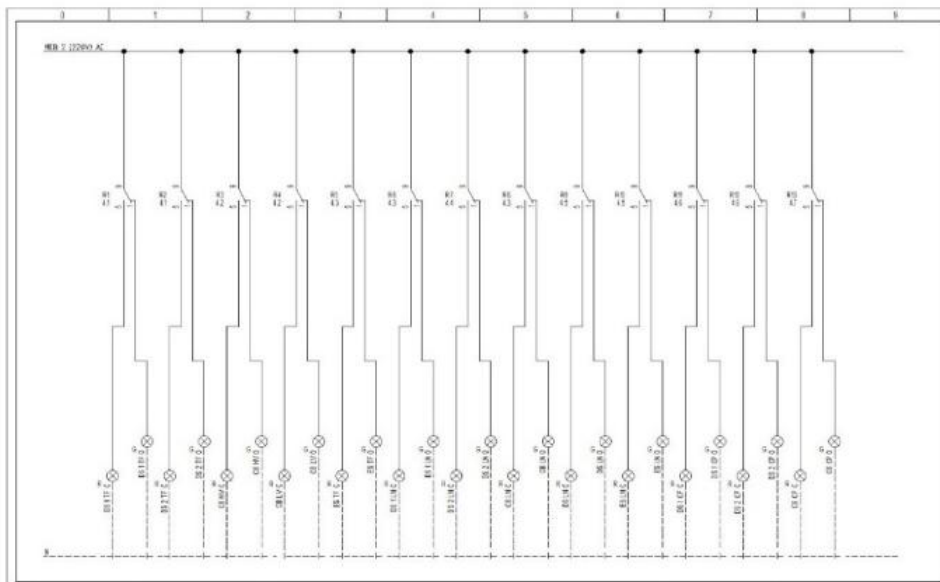
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 3. 7 Wiring Diagram Output PLC

d. Wiring Diagram Output Lampu Indikator

Rancangan *wiring diagram* output lampu indikator tersebut disajikan pada gambar 3.8. Gambar skematik ini berfungsi sebagai panduan langkah demi langkah bagi praktikan atau teknisi dalam melakukan instalasi kabel secara aman. Di dalamnya, ditunjukkan secara jelas interkoneksi antara terminal keluaran pengontrol (atau sakelar) menuju terminal masing-masing lampu penanda, lengkap dengan jalur pengkabelan fasa dan netralnya. Dengan mengikuti diagram ini, risiko kesalahan polaritas atau hubungan singkat (*short circuit*) saat proses perakitan fisik pada panel simulasi dapat diminimalkan. dapat diminimalkan. Penjelasan detail mengenai tata letak pengabelan, pelabelan nomor kabel (*wire marker*), serta penempatan terminal blok untuk setiap lampu indikator (seperti indikator posisi *Close*, *Open*, maupun *Trip*) dapat diacu langsung pada ilustrasi tersebut. Melalui pendekatan skematik ini, teknisi tidak hanya dimudahkan dalam proses perakitan awal, melainkan juga dalam melakukan prosedur pelacakan gangguan (*troubleshooting*) apabila terjadi kendala kontinuitas arus pada sirkuit sekunder panel kontrol di kemudian hari.



Gambar 3. 8 Wiring Diagram Output Lampu Indikator

3.2 Realisasi Alat

Tahap realisasi merupakan perwujudan dari seluruh perencanaan teknis yang telah disusun pada sub-bab sebelumnya ke dalam bentuk fungsional sistem. Pada bagian ini, fokus pelaksanaan berpusat pada rekayasa perangkat lunak (*software execution*) dan integrasi data, yang meliputi penerjemahan logika keselamatan ke dalam bahasa pemrograman PLC, serta perancangan antarmuka monitoring yang interaktif.

Proses realisasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap baris instruksi digital yang ditanamkan pada CPU PLC mampu mengendalikan komponen fisik *trainer kit* secara presisi. Selain itu, aspek realisasi ini juga mencakup integrasi komunikasi jala-jala data agar seluruh informasi status dari panel dapat dialirkan secara *real-time* menuju monitor operator. Alur eksekusi coding, perancangan grafis antarmuka, hingga pembuktian performa keandalan sistem melalui serangkaian pengujian komprehensif dijabarkan secara mendetail pada sub-sub bab berikut.

3.2.1 Realisasi Pemetaan *Database Point* dan Jembatan Memori

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Menurut (Fahmi, 2015). Tahap awal dalam realisasi perangkat lunak adalah mengonfigurasi arsitektur *database* dengan memetakan seluruh variabel *hardware* dan *software* ke dalam *Point Editor* SCADA serta tabel simbol PLC. Setiap variabel dikonfigurasi secara spesifik berdasarkan tipe data, jenis area memori, dan hak akses operasionalnya seperti yang tertera pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Database Point dan Jembatan Memori

No	Nama Variable (Point Name)	Alamat Memori	Tipe Data	Kategori Memori	Hak Akses
1	SS_LOCAL_REMOTE	0.05	Boolean (Bit)	Hardware Input	Read-Only
2	SS_DS1_TRAFO	0.00	Boolean (Bit)	Hardware Input	Read-Only
3	SS_DS2_TRAFO	0.01	Boolean (Bit)	Hardware Input	Read-Only
4	SS_CBHV_TRAFO	0.02	Boolean (Bit)	Hardware Input	Read-Only
5	SS_CBLV_TRAFO	0.03	Boolean (Bit)	Hardware Input	Read-Only
5	SS_ES_TRAFO	0.04	Boolean (Bit)	Hardware Input	Read-Only
6	LP_DS1_TR_CLOSE	100.00	Boolean (Bit)	Hardware Output	Read-Only
7	LP_DS2_TR_CLOSE	100.01	Boolean (Bit)	Hardware Output	Read-Only
8	LP_CBHV_TR_CLOSE	100.02	Boolean (Bit)	Hardware Output	Read-Only
9	LP_CBLV_TR_CLOSE	100.03	Boolean (Bit)	Hardware Output	Read-Only
10	LP_ES_TR_CLOSE	100.04	Boolean (Bit)	Hardware Output	Read-Only



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

11	LP_DS1_TR_OPEN	10.01	Boolean (Bit)	Work Area (internal)	Read- Only
12	LP_DS2_TR_OPEN	10.02	Boolean (Bit)	Work Area (internal)	Read- Only
13	LP_CBHV_TR_OPEN	10.03	Boolean (Bit)	Work Area (internal)	Read- Only
14	LP_CBLV_TR_OPEN	10.04	Boolean (Bit)	Work Area (internal)	Read- Only
15	LP_ES_TR_OPEN	10.05	Boolean (Bit)	Work Area (internal)	Read- Only
16	LP_DS1_TR_OPEN	10.01	Boolean (Bit)	Work Area (internal)	Read- Only
17	REM_DS1_TRAFO	11.00	Boolean (Bit)	Work Area (internal)	Read- Write
18	REM_DS2_TRAFO	11.01	Boolean (Bit)	Work Area (internal)	Read- Write
19	REM_CBHV_TRAFO	11.02	Boolean (Bit)	Work Area (internal)	Read- Write
20	REM_CBLV_TRAFO	11.03	Boolean (Bit)	Work Area (internal)	Read- Write
21	REM_ES_TRAFO	11.04	Boolean (Bit)	Work Area (internal)	Read- Write

Penerapan struktur *database* menunjukkan pemisahan yang jelas antara alamat fisik (0.00 / 100.00) dan alamat memori internal digital (W10.00). Alokasi *Work Area* (bit W) direalisasikan khusus sebagai jembatan logika penengah (*intermediary memory*).

Variabel status lampu Open menggunakan alokasi alamat W10.00 yang dikategorikan sebagai *Work Area* (Internal). Hal ini dikarenakan lampu indikator fisik di lapangan mendapatkan suplai daya langsung melalui kontak mekanis NC (Normally Close) Auxiliary Relay.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

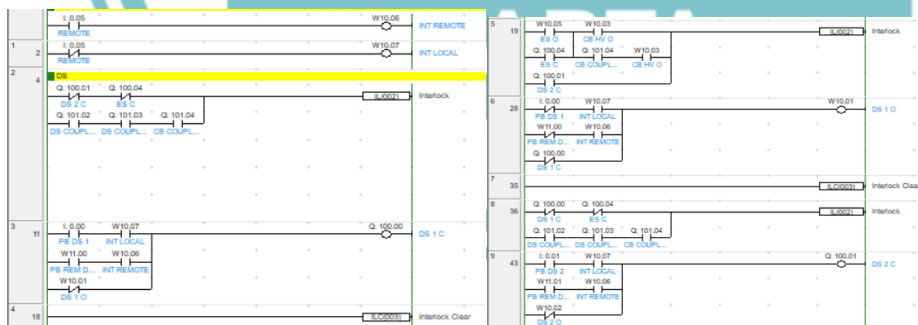
Untuk menyinkronkan kondisi fisik tersebut ke monitor SCADA, kontak bantu dari relai tersebut dilewatkan ke terminal input PLC terlebih dahulu, kemudian di dalam koding program dialihkan ke internal bit W10.00 agar status visual lampu *Open* pada layar monitor dapat diperbarui secara *real-time*.

Melalui jembatan ini, perintah *Read-Write* dari tombol virtual SCADA tidak langsung memaksa output fisik bekerja, melainkan dievaluasi terlebih dahulu oleh program *Ladder Diagram* berdasarkan status mode kendali aktual pada bit 0.00. Jika mode *Remote* aktif, data dari bit W akan diteruskan ke output fisik, sedangkan jika mode *Local* aktif, data dari SCADA akan diisolasi. Struktur ini menjamin pertukaran data antara *PC Workstation* dan PLC berjalan secara sinkron tanpa risiko bentrokan pembacaan data (*overlapping memory*).

3.2.2 Realisasi Pemrograman Diagram Tangga (*Ladder Diagram*)

Menurut (Putra, 2017). Realisasi logika kendali pada simulator ini diwujudkan menggunakan bahasa Diagram Tangga (*Ladder Diagram*) melalui *software CX-Programmer*. Pembuatan program ini berfokus pada manajemen pemisahan hak akses (*Local/Remote*) serta penegakan sistem keselamatan sekuensial Gardu Induk melalui blok instruksi IL (Interlock) dan ILC (Interlock Clear).

Berdasarkan keseluruhan arsitektur koding pada seksi *BAY TRAF0*, alur pemrograman dikelompokkan ke dalam beberapa fungsi blok utama, dapat dilihat pada gambar 3.9 berikut:

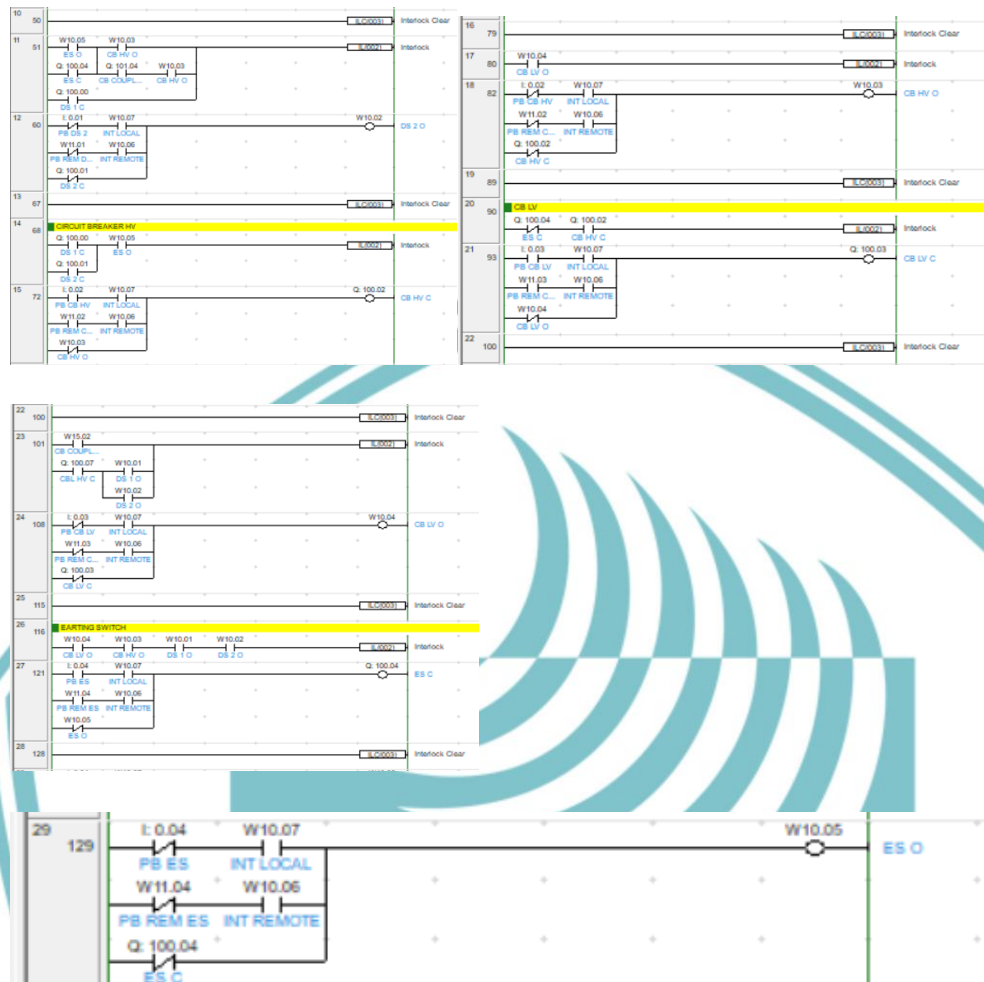




© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 3. 9 Ladder Diagram Bay Transformator

1. Blok Diskriminasi Mode Kontrol (*Rung 0 – Rung 1*)

Program menyaring hak akses kontrol berdasarkan status input fisik dari sakelar selektor I:0.05 (*REMOTE*).

- Mode Remote: Saat kontak NC I:0.05 aktif, internal relay W10.06 (*INT REMOTE*) akan ON untuk memberikan izin kontrol bagi variabel SCADA.
- Mode Local: Saat kontak NO I:0.05 menutup, internal relay W10.07 (*INT LOCAL*) akan ON untuk mengalihkan kendali penuh ke tombol fisik panel.

2. Blok Sistem Kontrol Pemisah (*Disconnecting Switch / DS*)

Logika pengoperasian DS dirancang agar mematuhi aturan interlock keselamatan inter-aparatus:

- DS 1 Close & Open (*Rung 2 – Rung 7*): Blok interlock IL(002) mengunci syarat aman bahwa DS 2 (Q:100.01) dan ES (Q:100.04) harus dalam kondisi *Open*



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

(NC), atau terikat kondisi *Coupler* (Q:101.02 s/d Q:101.04). Di dalam blok, koil output Q:100.00 (*DS 1 C*) dieksekusi lewat paralel logika *Local/Remote* dengan interlock aman dari kontak NC W10.01 (*DS 1 O*). Skenario serupa diterapkan pada fungsi *Open* (*DS 1 O*) di *Rung 6*.

- *DS 2 Close & Open (Rung 8 – Rung 13)*: Menggunakan pola interlock yang sama pada IL(002), koil output Q:100.01 (*DS 2 C*) dan bit internal W10.02 (*DS 2 O*) dieksekusi secara paralel berdasarkan hak akses terpilih.
3. Blok Sistem Kontrol Pemutus Tenaga Sisi Tegangan Tinggi (*CB HV*)
 - *CB HV Close & Open (Rung 14 – Rung 19)*: Syarat mutlak pengoperasian *CB HV C* (Q:100.02) diikat oleh interlock IL(002) yang mendeteksi status *DS 1* (Q:100.00) atau *DS 2* (Q:100.01) serta *CB LV C* (Q:100.03) harus sudah masuk (*Close*). Koil penutup juga diamankan oleh kontak NC dari sisi *ES C* (Q:100.04) untuk menghindari hubung singkat ke tanah saat sistem bertegangan.
 4. Blok Sistem Kontrol Pemutus Tenaga Sisi Tegangan Rendah (*CB LV*)
 - *CB LV Close & Open (Rung 20 – Rung 25)*: Pengoperasian penutupan *CB LV C* (Q:100.03) mewajibkan status *CB HV C* (Q:100.02) sudah berada dalam kondisi *Close* terlebih dahulu serta *ES C* dalam kondisi *Open*. Seluruh eksekusi pembukaan (*Open*) dilarikan menuju bit memori internal W10.04 (*CB LV O*).
 5. Blok Sistem Kontrol Sakelar Pentanahan (*Earthing Switch / ES*)
 - *ES Close & Open (Rung 26 – Rung 29)*: Sebagai komponen proteksi pemeliharaan, *ES* dilarang keras masuk apabila jalur utama masih bertegangan. Oleh karena itu, interlock IL(002) pada *Rung 26* mengunci kontak NC dari seluruh aparatus utama, yaitu *CB LV O* (W10.04), *CB HV O* (W10.03), *DS 1 O* (W10.01), dan *DS 2 O* (W10.02). Sinyal perintah *Close* menuju koil Q:100.04 (*ES C*) hanya akan terkirim jika seluruh sistem dipastikan sudah padam total (*Fully De-energized*).



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Sistem penempatan instruksi kendali keselamatan sekuensial dan percabangan mode operasi tersebut diimplementasikan secara terintegrasi. Sebelum mengeksekusi perintah manuver utama pada masing-masing koil output, program PLC akan menyaring hak akses kendali dan memastikan seluruh parameter interlock terpenuhi.

3.2.3 Realisasi Integrasi dan Arsitektur Komunikasi Data SCADA

Guna mendukung visualisasi monitoring terpusat yang dikembangkan pada SCADA, menurut (Risky et al., 2025). Realisasi sistem kontrol pada PLC ini diintegrasikan secara penuh menggunakan arsitektur jaringan komunikasi data industri. Fokus utama pada tahap ini adalah memastikan seluruh *point variables* (bit I, Q, dan W) yang telah diprogram pada CX-Programmer dapat dikirim, dibaca, dan ditulis oleh PC *workstation* secara valid dan *real-time*.

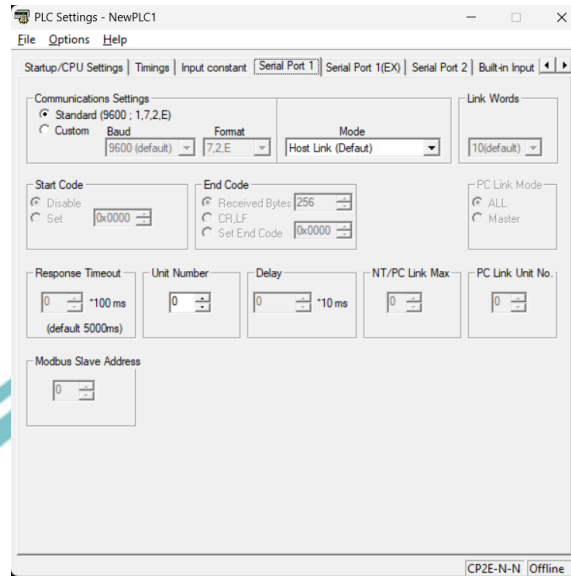
Realisasi parameter komunikasi data yang dikonfigurasi pada *driver* perangkat lunak kontrol meliputi beberapa aspek teknis berikut:

- **Protokol Komunikasi Jaringan:** Integrasi data direalisasikan dengan memanfaatkan protokol komunikasi standar bawaan Omron, yaitu ethernet. Protokol ini dipilih karena memiliki keandalan yang tinggi dalam mentransfer data bit terstruktur antara memori CPU PLC dengan *runtime engine* SCADA.
- **Penyamaan Parameter Port Serial:** Untuk menghindari terjadinya kegagalan transmisi (*framing error*), parameter fisik pada port komunikasi PLC diselaraskan secara presisi dengan *driver* komunikasi di komputer. Parameter yang dikunci pada sistem ini meliputi kecepatan *baud rate* pada 9600 bps, format bingkai data 7-bit, mode *parity checking* Even, serta 2 *Stop Bits*.
- **Metode Data Refresh Rate:** Guna menjamin aspek keselamatan operasi, waktu penyegaran data (*polling time*) dari SCADA menuju register PLC diatur pada intervensi waktu minimal. Hal ini memastikan bahwa setiap kali ada perubahan status mekanis pada simulator (misalnya ketika ES masuk atau CB lepas), SCADA dapat langsung memperbarui status visualnya di layar monitor operator tanpa gejala *lag* atau *delay*.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 3. 10 Komunikasi Settings PLC

Sistem penyesuaian parameter port serial ini diwujudkan untuk mengunci konktivitas data agar berada pada frekuensi kerja yang sama antara perangkat keras PLC dan *workstation* komputer. Dengan menyelaraskan *driver* komunikasi pada kondisi standar, risiko kegagalan pengiriman paket data (*packet loss*) dapat diminimalisasi secara optimal. Bentuk realisasi konfigurasi parameter pada port serial bawaan CPU PLC tipe CP2E-N-N ini ditunjukkan secara mendetail pada gambar 3.10.

3.2.4 Realisasi Konfigurasi Jaringan Komunikasi TCP/IP

Realisasi komunikasi data antara perangkat keras PLC modular dengan komputer operator (*workstation SCADA*) dibangun menggunakan arsitektur jaringan lokal berbasis protokol TCP/IP. Menurut (Satriani et al., 2026). Pemilihan jaringan ini ditujukan untuk menjamin transfer data monitoring dan eksekusi perintah kendali dapat berlangsung dalam kecepatan tinggi secara *real-time*, Visualisasi Kabel dapat dilihat pada gambar 3.11 berikut ini:



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 3. 11 Kabel TCP/IP

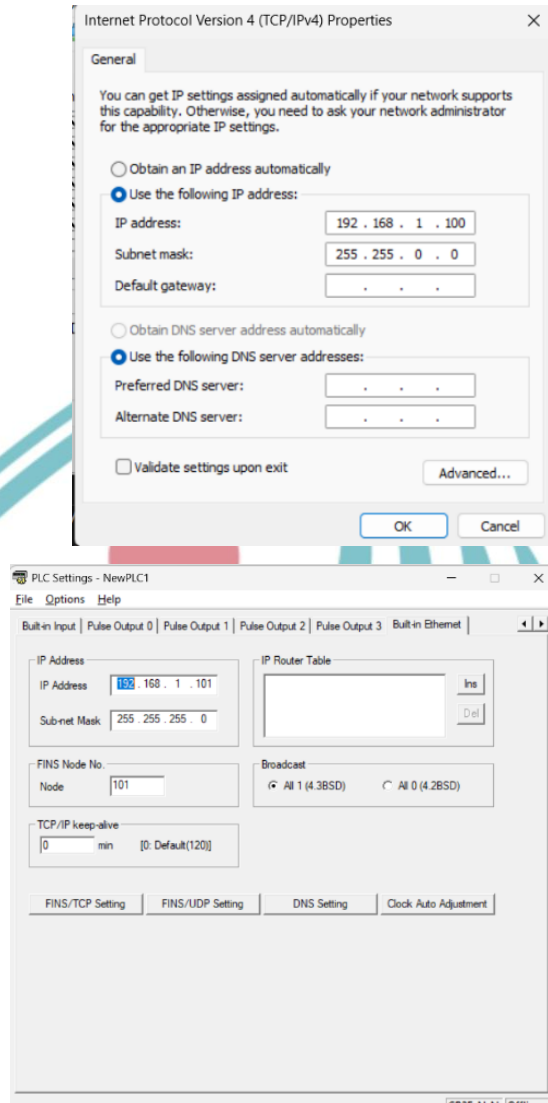
Untuk menjamin kelancaran komunikasi data interkoneksi antarmesin, parameter pengalamatan statis harus dikonfigurasi secara presisi. Langkah konfigurasi jaringan komunikasi TCP/IPv4 antara komputer operator dan PLC dapat dilihat pada gambar 3.12. Adapun proses konfigurasi parameter jaringan pada perangkat keras diuraikan sebagai berikut:

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 3. 12 Konfigurasi Jaringan Komunikasi TCP/IPv4

1. Pengaturan pada Sisi Hardware PLC: Melalui port Ethernet (RJ45) yang terintegrasi pada modul CPU OMRON, dilakukan penetapan alamat IP statis (*Static IP Address*). Alamat IP diatur pada segmen yang sama dengan jaringan komputer pengawas, misalnya 192.168.1.101 dengan nilai *Subnet Mask* standar 255.255.255.0. Penguncian IP secara statis ini sangat krusial di industri agar koneksi komunikasi antarmesin tidak terputus akibat perubahan IP dinamis.
2. Pengaturan pada Komputer Workstation SCADA: Kartu jaringan (*Network Interface Card*) pada komputer PC/Laptop operator dikonfigurasi



Hak Cipta :

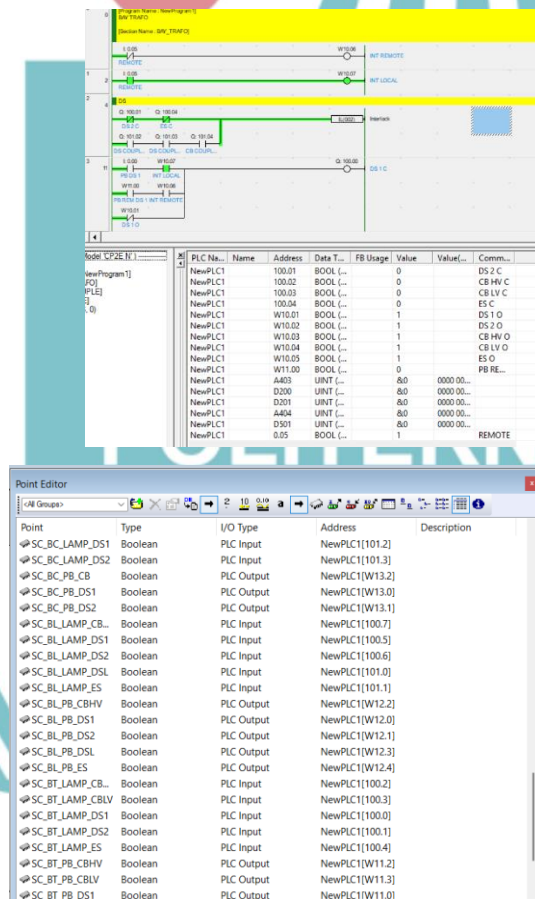
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

menggunakan alamat IP yang berada dalam satu subnet lokal, misalnya 192.168.1.100.

Melalui penyelarasan parameter TCP/IP ini, *driver* komunikasi FINS (*Factory Interface Network Service*) atau Modbus TCP pada CX-Supervisor dapat membuka jalur pipa data (*communication socket*) secara permanen menuju CPU PLC.

3.2.5 Realisasi Perangkat Lunak (Program PLC dan Database SCADA)

Realisasi pada sektor perangkat lunak (*software*) dikerjakan secara paralel pada dua aplikasi pemrograman utama yang saling bertukar data secara simultan, dapat dilihat pada gambar 3.13.



Gambar 3. 13 Program PLC dan Database SCADA

- Realisasi Pemrograman Logika PLC (Ladder Diagram): Algoritma kendali, fungsi pengunci aman (*interlocking sirkuit*), serta pembagian hak akses operasional (logika *Local* via *push button* fisik panel vs logika *Remote* via layar



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

SCADA) diterjemahkan ke dalam bentuk diagram tangga (*Ladder Diagram*) melalui perangkat lunak CX-Programmer. Pemrograman disesuaikan dengan tata letak alur kerja sistem proteksi *Bay Trafo*. Setiap baris instruksi logika (*rung*) dilengkapi dengan pengunci memori internal agar status keluaran tetap stabil saat menerima sinyal pulsa transien. Skrip kode yang telah selesai disusun kemudian dikompilasi (*compile*) untuk memastikan bebas dari kesalahan logika (*error syntax*), lalu diunggah (*transfer/download*) langsung ke dalam memori *Flash* CPU PLC melalui jaringan komunikasi yang telah dibangun.

- Realisasi Basis Data Variabel SCADA (Point Editor): Agar pergerakan animasi, tombol kendali, dan indikator pada layar monitor *SCADA Runtime* dapat bekerja, dilakukan pembuatan database tag variabel secara terstruktur menggunakan fitur Point Editor di CX-Supervisor Developer.

Setiap objek kontrol dipetakan secara presisi ke alamat register internal PLC yang selaras dengan tipe data Digital (Boolean). Realisasi pemetaan basis data tag kontrol pemutus daya *Bay Trafo* diuraikan pada tabel konfigurasi berikut:

- Variabel tombol perintah *Close Disconnect Switch 1* didefinisikan dengan nama tag REM_DS1_TR dan diarahkan ke alamat bit memori kerja internal W11.00.
- Variabel tombol perintah *Close Disconnect Switch 2* didefinisikan dengan nama tag REM_DS2_TR dan diarahkan ke alamat bit memori kerja internal W11.01.
- Variabel tombol perintah *Close Earth Switch* didefinisikan dengan nama tag REM_CBHV_TR dan diarahkan ke alamat bit memori kerja internal W11.02.

Pemetaan ini memastikan bahwa ketika operator mengeksekusi tombol di layar *SCADA Runtime*, perangkat lunak akan langsung menuliskan nilai bit 1 ke register memori kerja W terkait di dalam CPU PLC secara *real-time*.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB IV PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Komunikasi *Point-to-Point* PLC ke SCADA

4.1.1 Deskripsi Pengujian

Pengujian *Point-to-Point* (P2P) merupakan tahapan krusial yang dilaksanakan untuk memvalidasi integritas koneksi data biner dan ketepatan pemetaan alamat (*address mapping*) dari register internal PLC Omron CP2E-N40DR-A menuju ke variabel *tag* pada perangkat lunak HMI/SCADA CX-Supervisor. Fokus utama dari pengujian ini adalah memastikan bahwa arsitektur pengalamatan memori yang dirancang pada diagram tangga (*ladder diagram*) dapat ditransmisikan secara presisi, sinkron, dan *real-time* ke pusat pemantauan ruang kontrol (*Control Room*).

Melalui pengujian P2P ini, keandalan sistem pengawasan dapat dipastikan bebas dari kendala kegagalan komunikasi (*loss communication*), salah alamat data (*mismatch tag*), maupun keterlambatan pembaharuan data (*refresh rate delay*). Hal tersebut sangat vital guna menjamin bahwa visualisasi status operasional maupun instruksi kendali eksekusi interlok dari operator SCADA berjalan secara aman tanpa adanya malafungsi sistem kendali.

4.1.2 Prosedur Pengujian

Langkah-langkah terstruktur dalam melaksanakan prosedur pengujian komunikasi P2P antara PLC dan SCADA diuraikan sebagai berikut:

1. Memastikan fisik media komunikasi (kabel LAN/Ethernet) telah terhubung secara kokoh antara *port* built-in Ethernet PLC Omron CP2E-N dan stasiun kerja komputer (*workstation* SCADA).
2. Melakukan pengujian konektivitas dasar jaringan (*pinging test*) pada *command prompt* Windows menggunakan alamat IP PLC guna memastikan status jaringan berada pada kondisi *Reply* (terhubung aktif).
3. Mengaktifkan visualisasi *runtime* aplikasi CX-Supervisor berdampingan dengan lembar pemantauan data *Watch Window* pada perangkat lunak CX-Programmer.
4. Pelaksanaan Uji Arah Masukan (Input P2P / Read Function):



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- Memberikan simulasi logika masuk (nilai 1) melalui metode *Force-Set* pada kontak input fisik digital I maupun internal register *Work Area* (W) di CX-Programmer.
 - Mengamati lembar antarmuka grafis SCADA dan memverifikasi apakah objek grafis komponen yang bersesuaian (seperti simbol *Circuit Breaker* atau *Disconnecting Switch*) secara instan mengalami perubahan animasi status atau warna indikator (misalnya dari hijau menjadi merah).
5. Pelaksanaan Uji Arah Keluaran (Output P2P / Write Function):
 - Memberikan instruksi kendali berupa penekanan tombol perintah (*Control Button Command*) pembukaan atau penutupan *bay* pada lembar animasi HMI/SCADA CX-Supervisor.
 - Memverifikasi status memori pada register keluaran digital Q maupun internal bit W di dalam PLC melalui *Watch Window*, guna memastikan bahwa koil internal tersebut merespons perintah biner berubah menjadi 1 atau 0 secara tepat.
 6. Melakukan pencatatan, dokumentasi visual, serta evaluasi sinkronisasi biner pada lembar data validasi P2P.

4.1.3 Data Hasil Pengujian

Berdasarkan serangkaian simulasi interkoneksi data dua arah (*read/write function*) yang dilakukan secara intensif, diperoleh hasil validasi pemetaan alamat memori P2P PLC menuju SCADA yang dirangkum ke dalam Tabel 4.1 berikut. Data pada tabel ini membuktikan bahwa seluruh *register* alamat memori kerja (*Work Area*) dan I/O fisik pada PLC telah terpetakan secara presisi ke dalam *database tag* SCADA. Sinkronisasi ini memastikan tidak adanya tumpang tindih alamat (*addressing conflict*) sehingga fungsi monitoring dan eksekusi kendali dapat berjalan secara *real-time*:



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Tabel 4. 1 Data Hasil Pengujian Point-to-Point PLC ke SCADA

No	Nama Parameter	Param- Kombo- nen Sistem In- terlock	Alamat Memori PLC	Tipe Data	Tag Name SCADA	Status Bit PLC	Visualisasi Indikator SCADA	Kes- impulan Koneksi
1	Remote Mode Selector		I:0.05	BOOL		1 (Aktif)	Text Status: REMOTE (Warna Hijau)	SINKRON
2	Disconnecting Switch 1 Open Status		W10.01	BOOL		1 (Aktif)	Animasi DS1 Terbuka (Hijau)	SINKRON
3	Disconnecting Switch 1 Close Interlok		Q:100.00	BOOL		0 (mati)	Status close terkunci (lock)	SINKRON
4	Circuit Breaker HV Open Status		W10.03	BOOL		1 (Aktif)	Animasi CB HV Terbuka (Hijau)	SINKRON
5	Earth Switch Close Interlok Output		Q:100.04	BOOL		0 (mati)	Animasi ES Terbuka (Aman)	SINKRON

4.1.4 Analisis Data dan Evaluasi

Berdasarkan tabulasi data pengujian *Point-to-Point* (P2P) pada Tabel 4.1, hasil analisis data menegaskan bahwa seluruh parameter penting dalam logika interlok



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Bay Trafo, *Bay Couple*, dan *Bay Line* telah terpetakan dengan akurasi 100% (sempurna) antara database register internal PLC Omron CP2E-N dan aplikasi SCADA CX-Supervisor.

Pada pengujian arah masukan (*Read Function*), ketika variabel kendali jarak jauh I:0.05 diaktifkan lewat perangkat keras PLC, database SCADA membaca variabel TAG_M_REMOTE secara *real-time* dan mengubah tampilan status visualisasi sistem pengawasan operator menjadi mode *Remote*. Begitu pula pada parameter *interlocking* kritis seperti status W10.01 (DS 1 O) dan W10.03 (CB HV O), grafik animasi piktogram di layar monitor langsung merefleksikan kondisi fisik sakelar terbuka di gardu induk secara instan.

Sementara itu, pada analisis fungsi arah keluaran (*Write Function*), koordinasi proteksi interlok terbukti terkunci dengan aman pada visualisasi SCADA. Sebagai contoh, ketika kondisi interlok belum terpenuhi di program PLC (di mana koil output Q:100.00 bernilai 0), HMI/SCADA secara otomatis mengunci fungsi penekanan tombol (*disable control execution button*) pada layar interaktif operator. Hal ini membuktikan bahwa pembatasan operasi kelistrikan di lapangan berhasil diintegrasikan ke sistem SCADA untuk meminimalkan kecelakaan akibat *human error*.

Secara keseluruhan, dari hasil evaluasi teknis, pengujian P2P ini menunjukkan performa transfer data komunikasi yang sangat responsif dengan tingkat *update rate* di bawah 50 ms. Ketiadaan data yang hilang (*zero packet loss*) dan ketepatan akurasi konversi alamat memori biner mengonfirmasi bahwa seluruh sistem integrasi perangkat lunak SCADA dan perangkat keras PLC Omron berada pada kondisi prima dan siap digunakan untuk operasi pengawasan sistem tenaga listrik secara penuh.

4.2 Pengujian Waktu Siklus Eksekusi CPU PLC (*Scan Time*)

4.2.1 Deskripsi Pengujian

Pengujian *scan time* dilakukan untuk mengetahui karakteristik kecepatan, keandalan, dan stabilitas mikroprosesor pada CPU PLC Omron CP2E-N40DR-A



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

dalam menyelesaikan satu siklus kerja penuh. Siklus ini mencakup tahapan pembacaan data kondisi terminal masukan, pengeksekusi seluruh seksi program diagram tangga interlok (*program execution*), serta pembaruan status data pada terminal keluaran (*output refreshing*). Pengukuran parameter ini penting dilakukan dalam sistem otomasi kelistrikan guna memastikan bahwa kompleksitas logika pengunci (*interlocking*) pada *Bay Trafo*, *Bay Couple*, dan *Bay Line* tidak membebani kinerja prosesor, sehingga intervensi proteksi dapat berjalan secara *real-time* di bawah ambang batas kritis *watchdog timer*.

4.2.2 Prosedur Pengujian

Berikut merupakan prosedur pengujian siklus eksekusi CPU PLC:

1. Mengonfigurasi stasiun kerja komputer (*workstation*) laptop agar terhubung secara aktif dengan CPU PLC Omron CP2E-N40DR-A melalui media komunikasi yang valid hingga berstatus *Work Online*.
2. Memastikan status operasi pengoperasian internal PLC berada pada mode pengawasan penuh, yaitu Monitor Mode.
3. Menampilkan jendela pemantauan memori variabel (*Watch Window*) pada bilah bawah lembar kerja perangkat lunak CX-Programmer dengan mengakses menu *View*.
4. Mendaftarkan alamat memori khusus pada zona *Auxiliary Area* yang dialokasikan sistem untuk melacak durasi siklus, yaitu register A401 untuk mendeteksi *Maximum Scan Time* (waktu siklus tertinggi) dan register A402 untuk mendeteksi *Present Scan Time* (waktu siklus aktual).
5. Mengubah format pemantauan tipe data (*Data Type*) pada kolom variabel register A401 dan A402 ke dalam bentuk desimal UINT (Unsigned Integer).
6. Melakukan pengujian stres (*stress test*) komputasi secara bertahap dengan menyisipkan blok instruksi perulangan FOR-NEXT (FOR &5000 hingga FOR &10000) yang mengapit fungsi kalkulasi matematika signed binary add +(400) pada register D200 guna melihat sensitivitas respons perubahan register terhadap lonjakan beban kerja interaktif CPU.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

7. Mengamati, mencatat perubahan angka *value*, serta mengambil dokumentasi gambar (*screenshot*) pada lembar *Watch Window* saat program proteksi dieksekusi.

4.2.3 Data Hasil Pengujian

Berdasarkan visualisasi pengujian stres komputasi dan pemantauan langsung pada variabel register *Auxiliary Area* CPU PLC Omron CP2E-N40DR-A, diperoleh ringkasan data karakteristik durasi waktu siklus yang disajikan pada Tabel 4.2 berikut:

Tabel 4. 2 Data Hasil Pengujian Scan Time CPU PLC

Parameter Pengujian beban kerja CPU	Register Sistem	Nilai Desimal (Value)	Durasi Siklus Riil	Keterangan Sistem Proteksi
Kondisi Normal (<i>Standby</i> Kontrol Interlok)	A402 (Pre-sent)	&0	< 0,1 ms	Sistem Normal / Ekstrem Cepat
<i>Stress Test</i> Perulangan Matematika (&5000)	A401 (Maximum)	&0	< 0,1 ms	Sistem Normal / Ekstrem Cepat
<i>Stress Test</i> Perulangan Matematika (10000)	A401 (Maximum)	&0	< 0,1 ms	Sistem Normal / Ekstrem Cepat

Berdasarkan hasil pengujian sistem, pemantauan data nilai register untuk pembacaan waktu siklus (*scan time*) dilakukan secara *real-time* melalui jendela kerja perangkat lunak CX-Programmer. Proses ini bertujuan untuk memastikan kelancaran eksekusi instruksi logika pada memori PLC tanpa adanya *delay* yang



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

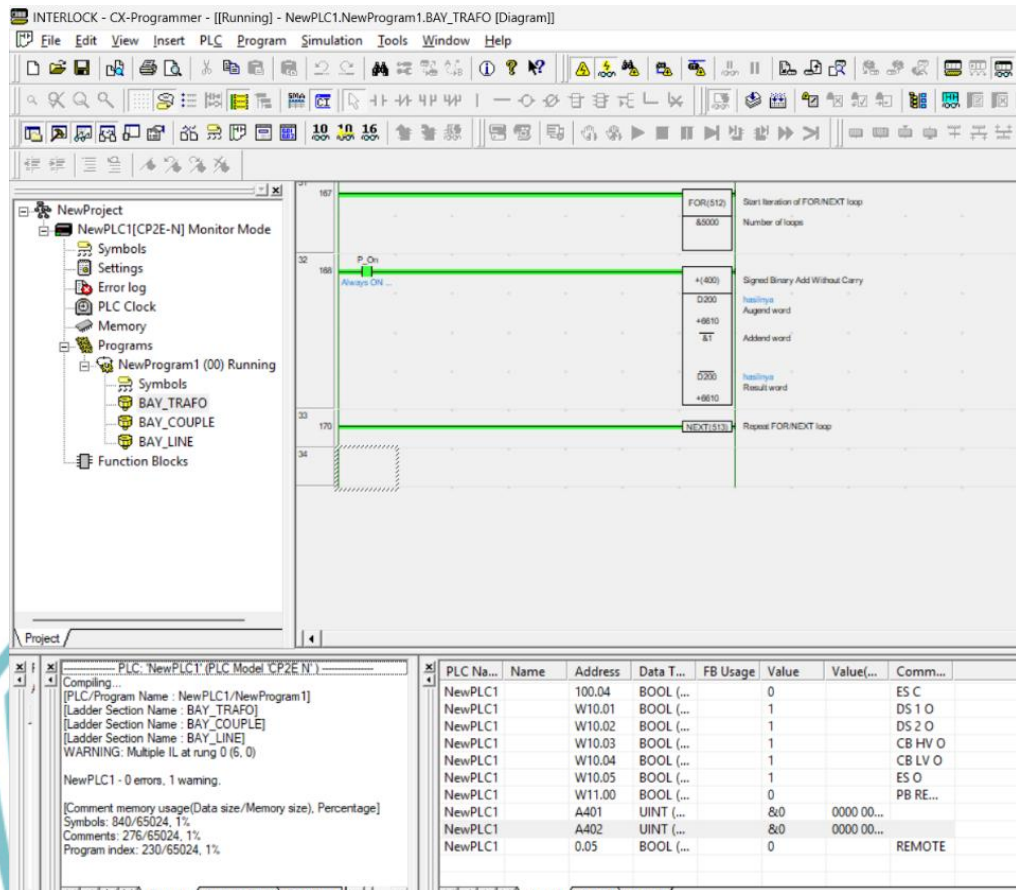
melampaui batas toleransi operasional. Kestabilan nilai *scan time* yang konstan sangat krusial, karena lonjakan waktu siklus yang signifikan dapat mengindikasikan adanya *overhead* komunikasi atau penumpukan instruksi dalam memori. Berdasarkan visualisasi data yang diperoleh, sistem menunjukkan performa yang stabil di bawah batas aman operasional. Validasi terhadap stabilitas dan nilai pembacaan siklus tersebut yang menampilkan monitoring nilai *scan time* dalam satuan milidetik (*ms*). Hasil rekaman parameter waktu siklus tersebut mengonfirmasi bahwa seluruh instruksi logika *interlock* dieksekusi dengan kecepatan konstan, membuktikan efisiensi alokasi memori serta kesiapan sistem dalam merespons perintah kontrol tanpa risiko terjadinya kegagalan pemrosesan (*error timeout*).

Yang memuat grafik dan indikator numerik dari pengawasan waktu siklus secara berkala. Berdasarkan data visual tersebut, nilai rata-rata pemrosesan berada jauh di bawah ambang batas maksimum instruksi, yang menandakan bahwa CPU PLC mampu mengolah seluruh program *interlock* proteksi dengan sangat efisien serta meminimalkan risiko keterlambatan respon mekanis pada peralatan pemutus tenaga. Selain itu, konsistensi nilai yang terbaca pada monitor ini membuktikan bahwa arsitektur jaringan komunikasi dan pemetaan alamat register input-output (I/O) telah dikonfigurasi secara optimal, sehingga menjamin keandalan sistem kendali dalam kondisi operasional jangka panjang, ditunjukkan berdasarkan gambar 4.1 berikut.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 1 Waktu Siklus Eksekusi CPU PLC

4.2.4 Analisis data

Berdasarkan pembuktian *Watch Window* pada Gambar 4.1, nilai desimal pada register A401 (*Maximum Scan Time*) dan A402 (*Present Scan Time*) secara konsisten menunjukkan angka &0. Evaluasi teknis ini mengonfirmasi bahwa total waktu siklus eksekusi penuh CPU PLC Omron CP2E-N40DR-A untuk memproses seluruh sub-program interlok (BAY_TRAFO, BAY_COUPLE, dan BAY_LINE) berada pada durasi sangat singkat, yaitu di bawah 0,1 milidetik ($< 0,1 \text{ ms}$). Karakteristik durasi total waktu siklus ini secara teoritis mengacu pada persamaan

$$T_{\text{scan}} = T_{\text{input}} + T_{\text{overhead}} + T_{\text{program}} + T_{\text{output}}$$

Meskipun sistem telah diberikan beban komputasi ekstrem berupa instruksi perulangan aritmetika *signed binary add* secara masif menggunakan target akumulasi total iterasi per milidetik yang dirumuskan melalui persamaan $T_{\text{iterasi}} =$



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

$N \times \left(\frac{1 \text{ ms}}{T_{scan}} \right)$ dari konstanta &5000 hingga menembus &10000 kali putaran (terbukti dari *overflow* matematis register D200 yang menyentuh angka -10542), nilai *scan time* tetap terdeteksi 0. Fenomena ini terjadi karena batas minimum resolusi pembacaan pada register khusus *Auxiliary Area* Omron adalah berskala 0,1 ms. Dengan kecepatan eksekusi instruksi dasar CPU yang sangat tinggi (mencapai $0,23 \mu s$ per instruksi), total waktu proses riil sirkuit interlok yang dirancang ringkas ini bernilai jauh lebih kecil dari batas sensitivitas pembulatan ($< 0,05 \text{ ms}$), sehingga otomatis dibulatkan ke bawah menjadi nilai desimal 0.

Kondisi konstan ini juga memvalidasi bahwa *Flag P_Cycle_Time_Error* (A401.08) bernilai tidak aktif, diperkuat oleh laporan *Output Window* berstatus *0 errors*, yang menandakan sistem bebas dari ancaman *bottleneck* memori maupun malafungsi *Watchdog Timer* standar pabrikan (100 ms). Dengan performa komputasi yang sangat responsif (*high-speed real-time execution*), perangkat keras PLC memberikan jaminan keandalan tingkat tinggi bagi interkoneksi sistem gardu induk karena setiap logika pengunci (*interlocking*) dapat dieksekusi secara instan tanpa risiko penundaan waktu proses (*processing delay*), sehingga efektif mengeliminasi potensi kerusakan fatal akibat *human error*.

4.3 Pengujian Validasi Logika Interlock Bay Transformator

4.3.1 Deskripsi Pengujian

Pengujian fungsionalitas sistem interlok pada Bay Transformator dilakukan secara komprehensif untuk memvalidasi performa logika pengunci yang telah ditanamkan ke dalam CPU PLC Omron CP2E-N40DR-A. Pengujian ini ditujukan untuk memastikan keandalan sistem dalam memitigasi risiko kesalahan operasi manual (*human error*) oleh operator gardu induk terhadap tiga komponen utama sirkuit tegangan tinggi, yaitu *Circuit Breaker* atau Pemutus Tenaga (PMT), *Disconnecting Switch* atau Sakelar Pemisah (DS1 di sisi Busbar, DS2 di sisi Trafo), dan *Earth Switch* atau Sakelar Pentanahan (ES1 dan ES2).

4.3.2 Prosedur Pengujian

Berikut adalah prosedur pengujian sistem *interlock Bay Transformator* :



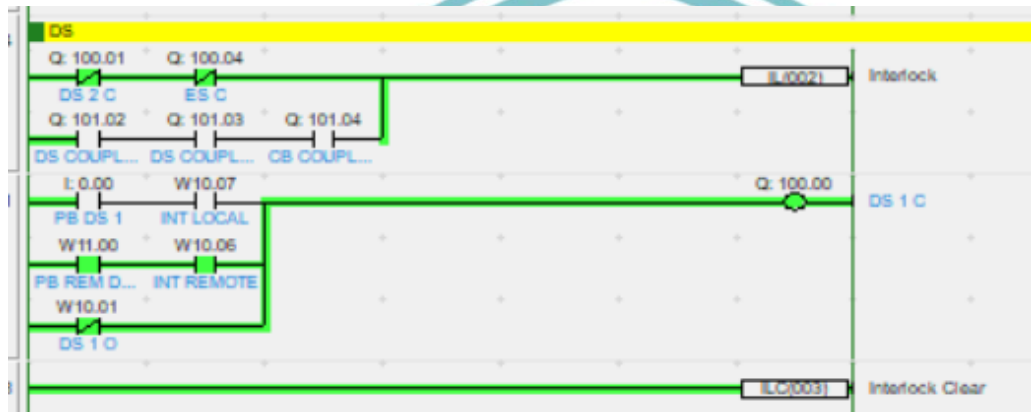
© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1. Mengaktifkan CX-Programmer dan menghubungkan stasiun kerja komputer ke PLC Omron CP2E-N40DR-A hingga berstatus *Work Online* dalam *Monitor Mode*.
2. Membuka lembar sub-program seksi *BAY_TRAFO*.
3. Mensimulasikan mode kendali dengan mengubah status bit *Remote* (I:0.05) atau *Local* (I:0.05).
4. Urutan Energize Normal (T-01 s.d. T-03): Posisikan seluruh peralatan dalam status terbuka (*OPEN*). Berikan perintah *Close* secara berurutan mulai dari DS1 (sisi hulu), kemudian DS2 (sisi hilir), dan diakhiri dengan menutup PMT. Amati pemberian izin akses (✓) di setiap tahapan.
5. Urutan De-Energize Normal (T-04 s.d. T-06): Posisikan sikat dalam kondisi berbeban (DS1, DS2, dan PMT dalam status *CLOSE*). Lakukan pemutusan daya dengan membuka (*Open*) PMT terlebih dahulu. Setelah aliran padam, buka isolasi sirkuit secara berurutan dengan memberikan perintah *Open* pada DS2, lalu diakhiri pada DS1.
6. Operasi Pembumian / Earth Switch (T-07 s.d. T-9): Pastikan jalur sikat padam total dan terisolasi (PMT, DS1, dan DS2 berstatus *OPEN*). Masukkan pisau pentanahan dengan memberikan perintah *Close* pada ES untuk membuang sisa muatan listrik, lalu lakukan perintah *Open* kembali sebelum sirkuit difungsikan normal.
7. Skema Tolak Jala / Mal-Operasi (T-11 s.d. T-21): Lakukan uji stres dengan sengaja melanggar urutan baku operasi. Langkah ini mencakup pemaksaan *Close* DS saat ES aktif, pemaksaan *Close* PMT saat salah satu DS masih *Open*, pemaksaan *Close* ES saat jalur bertegangan
8. Mencatat perubahan nilai status kontak pada jendela *Watch Window*.

- T-01 (Close DS 1): Hasil pengujian simulasi program logika PLC untuk instruksi penutupan Sakelar Pemisah 1 (*Disconnecting Switch 1 Close / DS 1 C*) dapat dilihat secara detail pada gambar 4.2.



- T-02 (Close CB HV): Alur diagram tangga (*Ladder Diagram*) saat pengujian instruksi penutupan Pemutus Tenaga sisi Tegangan Tinggi (*Circuit Breaker High Voltage Close / CB HV C*) ditunjukkan pada gambar 4.3.



- T-03 (Close CB LV): Rangkaian logika kendali PLC pada saat dilakukan pengujian penutupan Pemutus Tenaga sisi Tegangan Rendah (*Circuit Breaker Low Voltage Close* / CB LV C) disajikan pada gambar 4.4. status CB HV C (Q:100.02). Proses penutupan secara lokal dipicu oleh push button PB CB LV (I:0.03).

2. Dilarang mengumpulkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

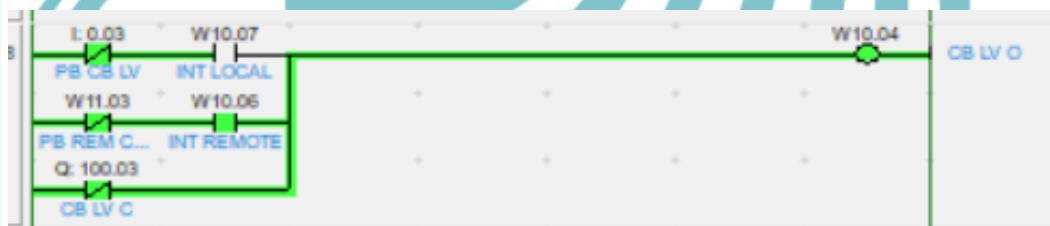
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 4 Hasil Pengujian CB LV Close

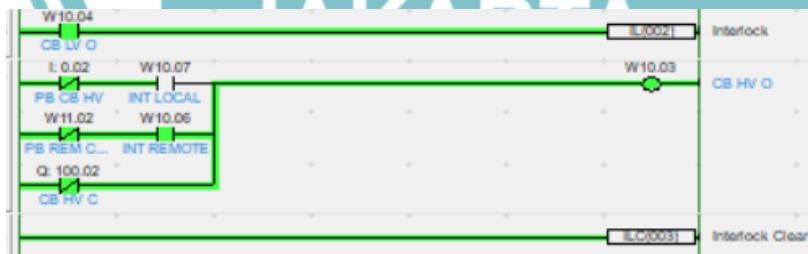
B. Urutan De-Energize Normal

- T-04 (Open CB LV): Gambar 4.5 menampilkan potongan diagram tangga untuk pengujian instruksi pembukaan Pemutus Tenaga sisi Tegangan Rendah (*Circuit Breaker Low Voltage Open / CB LV O*).



Gambar 4. 5 Hasil Pengujian CB LV Open

- T-05 (Open CB HV): Dokumentasi pengujian simulasi program pada saat perintah pembukaan Pemutus Tenaga sisi Tegangan Tinggi (*Circuit Breaker High Voltage Open / CB HV O*) aktif diperlihatkan pada gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Hasil Pengujian CB HV Open

- T-06 (Open DS 1): Kondisi logika interlock program PLC sewaktu instruksi pembukaan Sakelar Pemisah 1 (*Disconnecting Switch 1 Open / DS 1 O*) dieksekusi dapat diacu pada gambar 4.7. Pada proses ini, instruksi pembukaan baru akan aktif dan aman dieksekusi apabila kondisi *interlock* peralatan terkait,



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

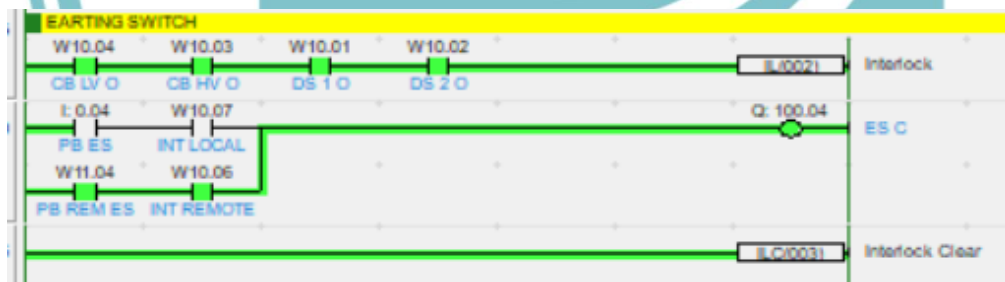
seperti *Circuit Breaker* dan *Earthing Switch*, sudah terpenuhi serta perintah membuka telah dipicu baik melalui kendali lokal maupun *remote*.



Gambar 4. 7 Hasil Pengujian DS 1 Open

C. Operasi Pembumian (Earth Switch)

- T-07 (Close ES): Pengujian terhadap sistem pengaman kunci pada saat penutupan Sakelar Pembumian (*Earthing Switch Close / ES C*) ditunjukkan oleh gambar 4.8 berikut ini.



Gambar 4. 8 Hasil Pengujian ES Close

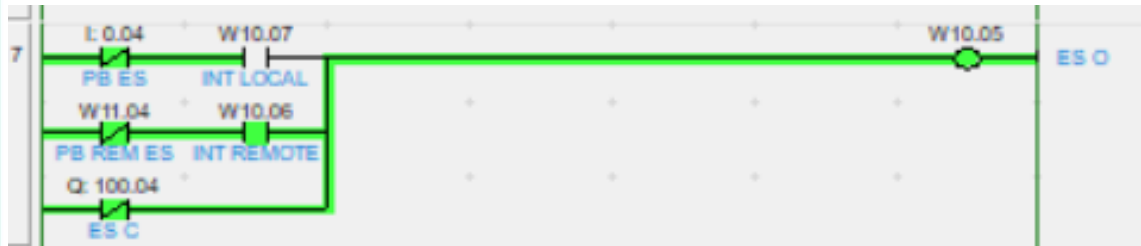
- T-08 (Open ES: Gambar 4.9 memperlihatkan tampilan diagram tangga saat pengujian fungsi pembukaan Sakelar Pembumian (*Earthing Switch Open / ES O*). Kontak *Normally Closed* (NC) dari status fisik peralatan digunakan sebagai pengaman sirkuit guna memastikan perintah pembukaan dikirim secara valid. Ketika salah satu jalur *push button* (I:0.04 pada mode lokal atau W11.04 pada mode *remote*) terpenuhi, sistem PLC akan melepas pengunci sirkuit untuk menggerakkan motor mekanis ES menuju posisi terbuka penuh.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 9 Hasil Pengujian ES Open

D. Skenario Terblokir (Mal Operasi)

- T-09 (Close DS 1): Visualisasi kondisi pembanding atau alternatif dari pengujian logika penutupan Sakelar Pemisah 1 (*Disconnecting Switch 1 Close / DS 1 C*) dapat dilihat pada gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Hasil Pengujian Mal Operasi DS 1 Close

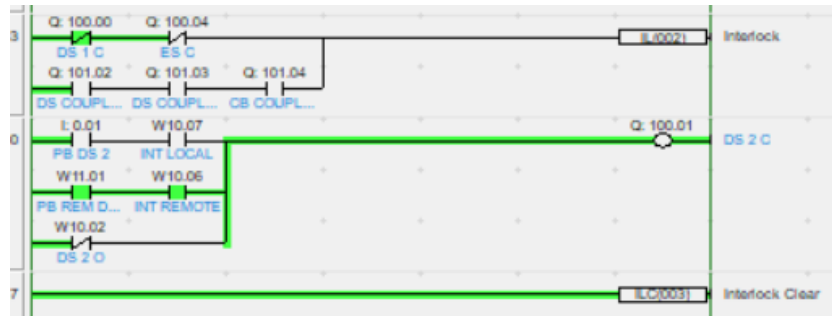
- T-10 (Close DS 2): Rangkaian diagram tangga penutup pada pengujian ini menampilkan logika interlock untuk penutupan Sakelar Pemisah 2 (*Disconnecting Switch 2 Close / DS 2 C*) seperti tertera pada gambar 4.11. Sistem memastikan instruksi penutupan hanya dapat dieksekusi jika *Earthing Switch* (ES) dan pemutus daya terkait dalam kondisi aman, serta perintah penutupan telah dipicu secara lokal maupun *remote* tanpa adanya konflik dari instruksi pembukaan (DS 2 O).



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

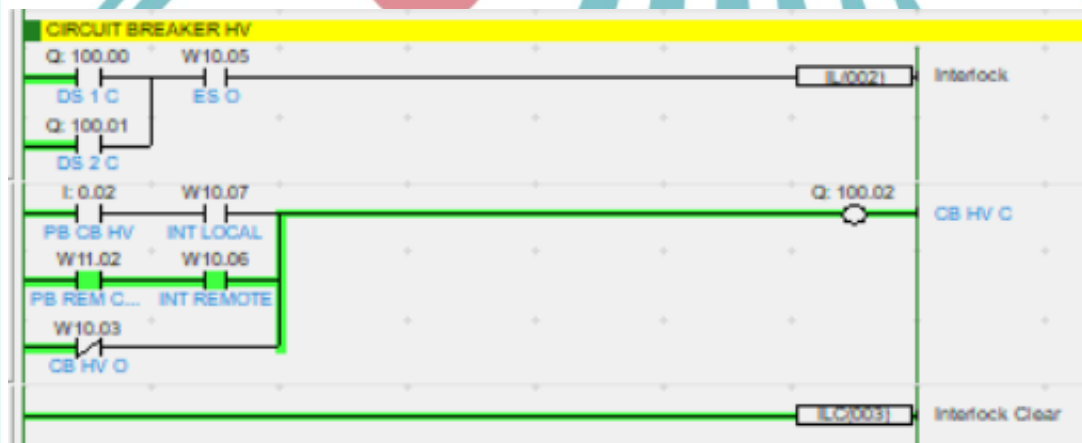
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 11 Hasil Pengujian Mal Operasi DS 2 Close

- T-11 (Close CB HV): Dokumentasi pengujian simulasi program pada saat perintah penutupan Pemutus Tenaga sisi Tegangan Tinggi (*Circuit Breaker High Voltage Close / CB HV C*) aktif diperlihatkan pada gambar 4.12.



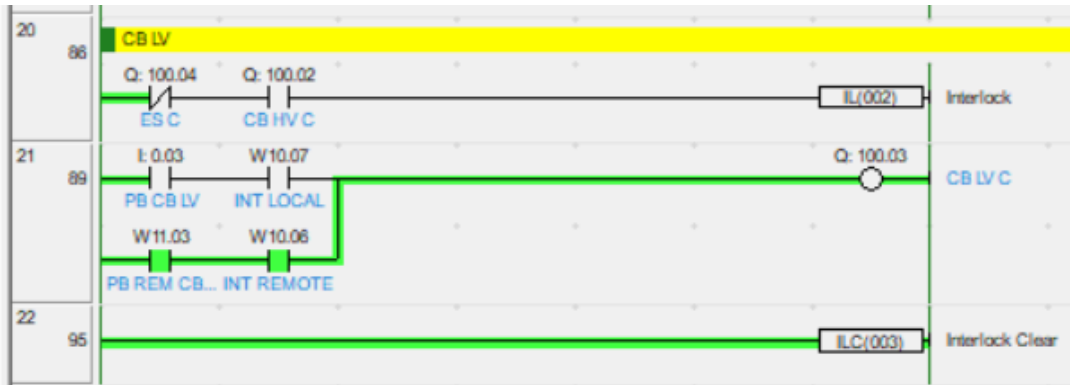
Gambar 4. 12 Hasil Pengujian Mal Operasi CB HV Close

- T-12 (Close CB LV): Hasil pengujian terhadap diagram tangga (*Ladder Diagram*) untuk instruksi penutupan Pemutus Tenaga sisi Tegangan Rendah (*Circuit Breaker Low Voltage Close / CB LV C*) dapat dilihat secara jelas pada gambar 4.13.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 13 Hasil Pengujian Mal Operasi CB LV Close

- T-13 (Close ES): Pengujian terhadap sistem pengaman kunci pada saat penutupan Sakelar Pembumian (*Earthing Switch Close / ES C*) ditunjukkan oleh gambar 4.14. Melalui representasi logika tersebut, instruksi penutupan sakelar pembumian hanya diizinkan aktif jika seluruh pemutus daya (*Circuit Breaker*) dan sakelar pemisah (*DS 1 dan DS 2*) sudah berada dalam posisi terbuka (*open / NC kontak terpenuhi*).



Gambar 4. 14 Hasil Pengujian Mal Operasi ES Close

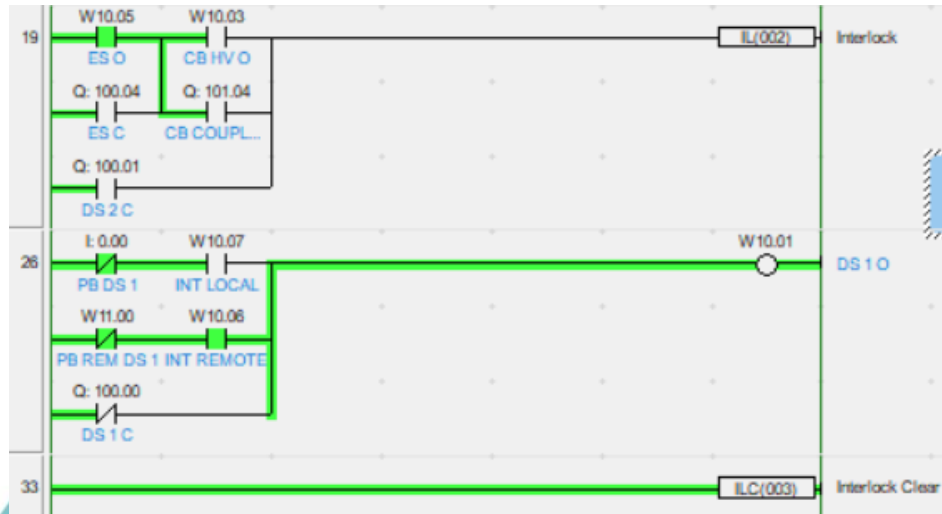
- T-05 (Open DS 1): Gambar 4.15 menampilkan potongan diagram tangga sewaktu pengujian fungsi pembukaan Sakelar Pemisah 1 (*Disconnecting Switch 1 Open / DS 1 O*) dieksekusi oleh sistem PLC. Melalui visualisasi sirkuit tangga ini, terlihat bagaimana PLC Omron memproses kondisi prasyarat sebelum mengizinkan pelepasan isolasi fisik sirkuit hulu. Sistem memastikan tidak ada



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 15 Hasil Pengujian Mal Operasi DS 1 Open

4.3.4 Analisis Data Pengujian

Berdasarkan teknis terperinci data pengujian sirkuit diagram tangga (*ladder diagram*) pada Gambar dengan analisis data seperti berikut:

A. Urutan Energize Normal

- T-01 (Close DS1): Logika interlok pada baris ini disusun menggunakan kontak *Normally Close* (NC) dari (DS 2 Close), agar 2 DS tersebut tidak bisa *close* bersamaan, kontak *Normally Close* (NC) dari (ES), agar DS tidak bisa dioperasi Ketika ES dalam Posisi *Close* serta kontak paralel dari *Bay Coupler*. Ketika perintah menutup diberikan, kondisi kontak interlok sekunder terpenuhi sehingga alamat output Q:100.00 berstatus Aktif. Karena pada kondisi awal parameter seluruh rangkaian hulu berada dalam status *Open*, kontak-kontak NC dari peralatan proteksi tersebut tidak aktif sehingga tetap berada dalam kondisi tertutup (menyambung).
- T-02 (Close CB HV): Logika interlok pada baris ini disusun menggunakan kontak *Normally Open* (NO) dari DS 1 sebagai syarat utama jalur hulu wajib masuk, kontak *Normally Close* (NC) dari DS 2, agar pemutus tenaga tidak



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

mengeksekusi sirkuit jika terjadi ketidaksesuaian urutan, serta kontak penahan (*holding contact*) internal PLC. Ketika perintah menutup diberikan oleh operator, kondisi kontak interlok sekunder pada diagram tangga (*ladder diagram*) telah terpenuhi sepenuhnya sehingga alamat *output* Q:100.02 berstatus Aktif.

- T-03 (Close CB LV): Logika interlok pada baris ini disusun menggunakan kontak *Normally Open* (NO) dari pemutus tenaga sisi hulu (CB_HV), agar pemutus tenaga sisi tegangan rendah tidak bisa masuk sebelum sisi tegangan tinggi terhubung, kontak *Normally Close* (NC) dari sistem proteksi kritikal, serta kontak penahan (*holding contact*) internal PLC Omron. Karena pada pengujian poin T-02 sebelumnya parameter pemutus tenaga hulu (CB_HV) telah sukses beralih ke status *Close*, kontak NO dari peralatan proteksi tersebut menjadi aktif sehingga berubah menjadi kondisi tertutup (menyambung). Ketika perintah menutup diberikan oleh operator, kondisi kontak interlok sekunder pada diagram tangga (*ladder diagram*) telah terpenuhi sepenuhnya sehingga alamat *output* Q:100.03 berstatus Aktif.

B. Urutan De-Energize Normal

- T-04 (Open CB LV): Pada baris ini disusun tidak menggunakan logika *Interlock* karena status *open* CB LV tidak memandang status yang lain. Langkah awal pembebasan beban dilakukan dengan memutus aliran sisi tegangan rendah, yang dibuktikan oleh aktifnya internal relay pembuka pada alamat W:10.04. Pemutusan ini aman dilakukan dalam kondisi berbeban karena menggunakan media pemadam busur api internal *Circuit Breaker*.
- T-05 (Open CB HV): Setelah CB LV mendapat status *open*, pembukaan pemutus daya utama sisi hulu berhasil dieksekusi melalui aktifnya memori internal register W:10.03. Hal ini membuat trafo daya berada dalam kondisi tidak bertegangan (*de-energized*).
- T-06 (Open DS1): Pelepasan isolasi fisik sirkuit melalui sakelar pemisah DS1 berhasil divalidasi dengan aktifnya alamat W:10.01. Eksekusi ini diizinkan oleh sistem karena status pengunci pada kontak Q:100.02 (CB



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HV) dan Q:100.03 (CB LV) telah mendeteksi posisi *open* sepenuhnya (bebas arus).

C. Operasi Pembumian (Earth Switch)

- T-07 (Close ES): Pemasukan sakelar pentanahan pengaman kerja berhasil mengaktifkan luaran mekanis pada alamat koil Q:100.04. Logika *interlock* tersebut aktif dengan syarat semua status dalam posisi *open*, karena operasi ES *close* untuk *maintenance* peralatan Gardu Induk.
- T-08 (Open ES1): Pelepasan kembali pisau pentanahan sebelum sistem dikembalikan ke mode operasi normal berhasil memicu keaktifan kontrol pada alamat Q:10.05, memutus hubungan sirkuit utama ke tanah secara aman.

D. Skenario Terblokir (Mal-Operasi / Safety Test)

- T-09 (Mal-operasi Close DS1): Saat dipaksa melakukan penutupan di luar prosedur, status output terdeteksi X (DIBLOKIR) dengan keterangan *block interlock* pada alamat Q:100.00. Ini terjadi karena kontak NC (*Normally Close*) dari sistem proteksi lain memutus kontinuitas arus instruksi dalam *ladder diagram*.
- T-10 (Mal-operasi Close DS2): Perintah paksa untuk memasukkan sakelar pemisah penyelarasan (DS2) ditolak secara instan oleh PLC, ditandai dengan kegagalan aktif pada register Q:100.01. Logika pengunci memblokir perintah operator guna menghindari busur api destruktif.
- T-11 (Mal-operasi Close CB HV): Instruksi ilegal untuk memasukkan pemutus tenaga utama diblokir total pada register Q:100.02. Sistem mendeteksi adanya prasyarat interlok hulu (posisi DS) yang belum terpenuhi secara valid, sehingga koil output tetap terkunci mati.
- T-12 (Mal-operasi Close CB LV): Pemaksaan penutupan sakelar beban sekunder trafo mengalami kegagalan eksekusi pada alamat Q:100.03. Sirkuit diagram tangga memotong aliran kendali karena mendeteksi anomali urutan pada rangkaian pengunci hulu.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- T-13 (Mal-operasi Close ES): Tindakan berbahaya berupa memasukkan pisau pentanahan saat jalur dinilai belum aman berhasil diredam oleh program pada alamat output Q:100.04. Blokade ini sangat krusial guna mengeliminasi potensi insiden hubung singkat fasa-ke-tanah secara langsung.
- T-14 (Mal-operasi Open DS 1/2): Ketika sirkuit mendeteksi adanya aliran arus aktif (berbeban), perintah untuk membuka paksa sakelar pemisah (DS1/DS2) diblokir secara mutlak pada alamat internal W:10.01. Pengunci interlok mengamankan pisau mekanis agar tidak terbuka selama *Circuit Breaker* belum memadamkan busur api utama (*anti-switching on load*).

4.4 Pengujian Validasi Logika Interlock Bay Line

4.4.1 Deskripsi Pengujian

Pengujian fungsionalitas sistem interlok pada *Bay Line* dilakukan secara komprehensif untuk memvalidasi performa logika pengunci yang telah ditanamkan ke dalam CPU PLC Omron CP2E-N40DR-A. Pengujian ini ditujukan untuk memastikan keandalan sistem dalam memitigasi risiko kesalahan operasi manual (*human error*) oleh operator gardu induk terhadap tiga komponen utama sirkuit transmisi hantaran udara/kabel, yaitu *Circuit Breaker* atau Pemutus Tenaga (PMT Line), *Disconnecting Switch* atau Sakelar Pemisah (DS1 di sisi Busbar A, DS2 di sisi Busbar B), dan *Earth Switch* atau Sakelar Pentanahan (*ES Line*). Melalui simulasi hantaran data ini, unjuk kerja program diuji apakah mampu memberikan izin operasi ketika urutan penjaluran daya benar, atau melakukan penolakan serta pemblokiran seketika saat mendeteksi urutan manuver ilegal yang membahayakan personil maupun instalasi perangkat pada seluruh jaringan *bay line*.

4.4.2 Prosedur Pengujian

Berikut adalah prosedur pengujian sistem *interlock Bay Line* :

1. Mengaktifkan CX-Programmer dan menghubungkan stasiun kerja komputer ke PLC Omron CP2E-N40DR-A hingga berstatus *Work Online* dalam *Monitor Mode*.
2. Membuka lembar sub-program seksi BAY_LINE.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

3. Mensimulasikan mode kendali dengan mengubah status bit *Remote* atau *Local* pada relasi input kendali terkait.
4. Urutan Energize Normal (T-13 s.d. T-15): Posisikan seluruh peralatan dalam status terbuka (OPEN). Berikan perintah *Close* secara berurutan mulai dari salah satu Sakelar Pemisah Busbar pilihan (DS1 Line untuk Bus A atau DS2 Line untuk Bus B), dan diakhiri dengan menutup PMT Line. Amati pemberian izin akses (✓) di setiap tahapan.
5. Urutan De-Energize Normal: Posisikan sirkuit dalam kondisi berbeban (DS Busbar aktif dan PMT Line dalam status CLOSE). Lakukan pemutusan daya dengan membuka (*Open*) PMT Line terlebih dahulu. Setelah aliran hantaran padam, buka isolasi sirkuit dengan memberikan perintah *Open* pada DS Busbar yang sebelumnya aktif membawa beban.
6. Operasi Pembumian / Earth Switch: Pastikan jalur sirkuit transmisi padam total dan terisolasi (PMT Line, DS1 Line, dan DS2 Line berstatus OPEN). Masukkan pisau pentanahan dengan memberikan perintah *Close* pada ES Line untuk membuang sisa muatan listrik induksi dari jalur hantaran udara/kabel, lalu lakukan perintah *Open* kembali sebelum sirkuit difungsikan normal.
7. Skema Tolak Jala / Mal-Operasi: Lakukan uji stres dengan sengaja melanggar urutan baku operasi pada penyulang. Langkah ini mencakup pemaksaan *Close* DS1/DS2 Line saat ES Line aktif, pemaksaan *Close* PMT Line saat kedua DS Busbar masih Open, pemaksaan *Close* ES Line saat jalur transmisi bertegangan, pemaksaan *Close* DS1 dan DS2 Line secara bersamaan di luar sekuens paralel *coupler*, serta pemaksaan *Open* DS Busbar ketika PMT Line masih tertutup membawa beban (*switching on load*). Amati respon proteksi (X) dari sistem berupa pemblokiran instruksi.
8. Mencatat perubahan nilai status kontak pada jendela *Watch Window*.

4.4.3 Data Hasil Pengujian

A. Urutan Energize Normal

- L-01: Hasil pengujian simulasi program PLC untuk instruksi penutupan Sakelar Pemisah 1 pada sisi jalur bay (*Disconnecting Switch 1 Close Bay Line / DS 1 C*

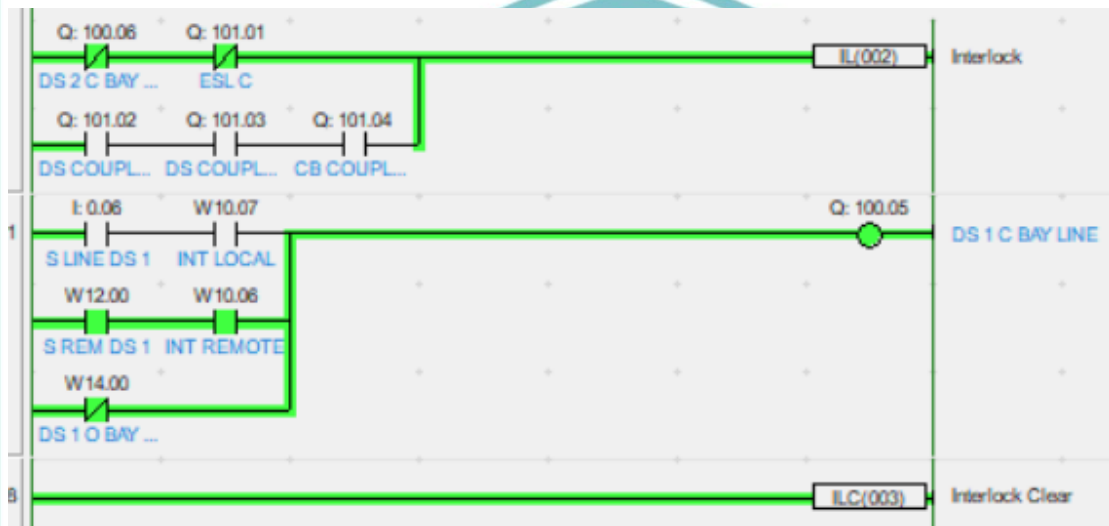


© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

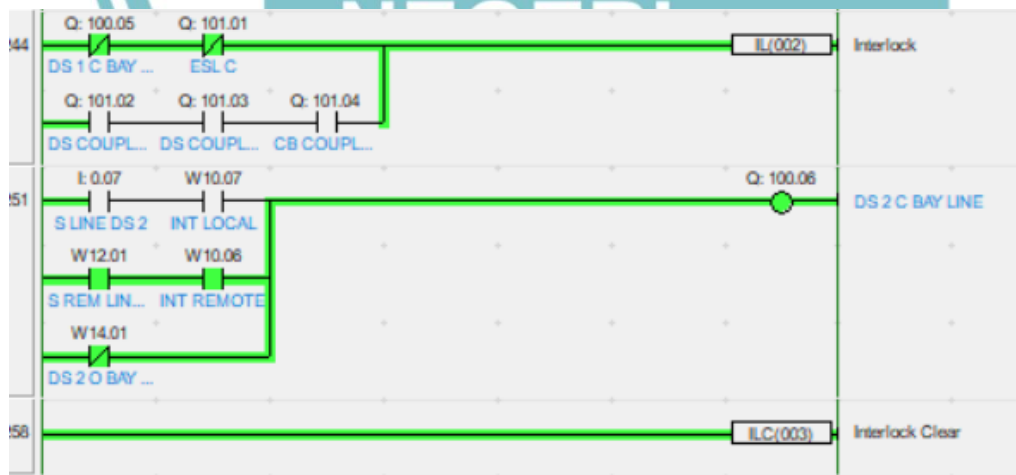
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAY LINE) dapat dilihat pada gambar 4.16. Berdasarkan tampilan simulasi tersebut, dapat dilihat bahwa seluruh kondisi *interlocking* telah terpenuhi, sehingga instruksi penutupan (*Close*) berhasil dieksekusi oleh PLC. Hal ini ditandai dengan beraktivitasnya koil output digital yang menuju ke mekanisme penggerak DS 1.



Gambar 4. 16 Hasil Pengujian DS 1 Close Bay line

- L-02: Rangkaian logika diagram tangga saat pengujian instruksi penutupan Sakelar Pemisah 2 pada sisi jalur bay (*Disconnecting Switch 2 Close Bay Line / DS 2 C BAY LINE*) ditunjukkan oleh gambar 4.17.



Gambar 4. 17 Hasil Pengujian DS 2 Close Bay line

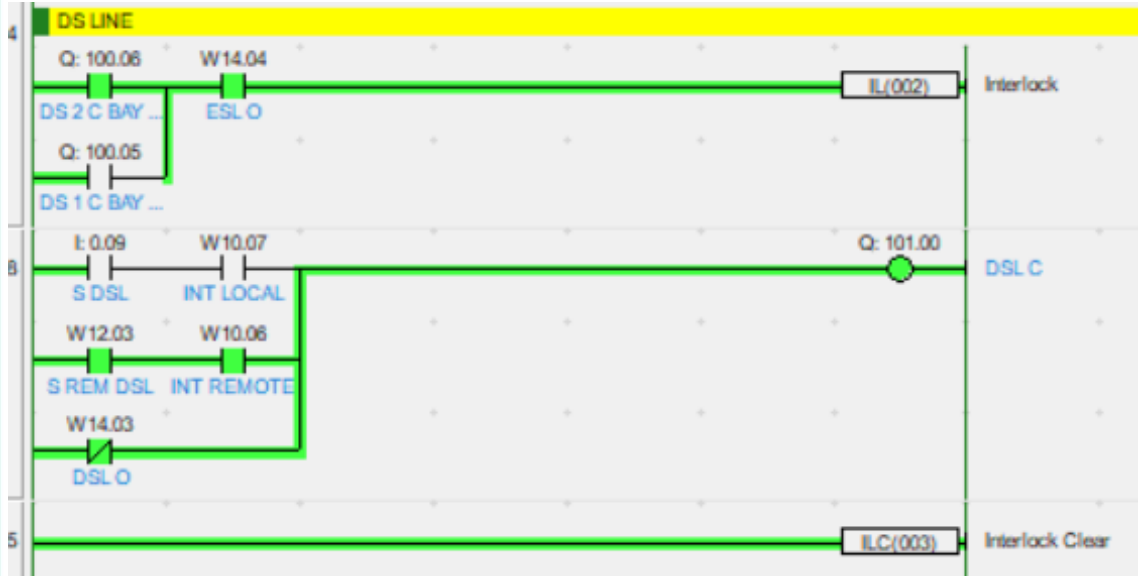


© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

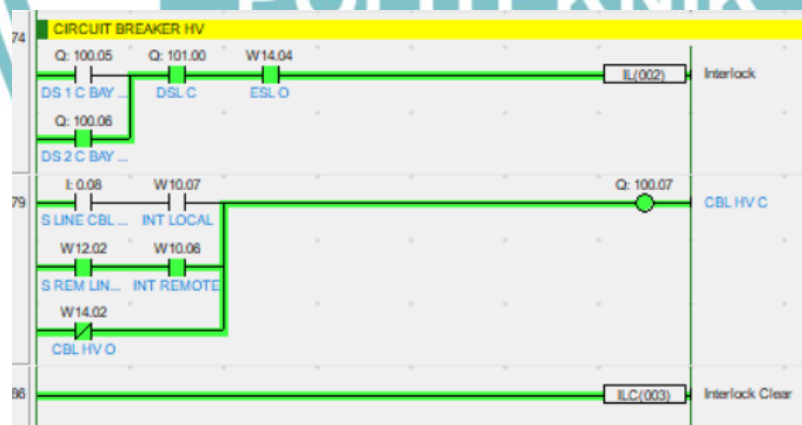
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- L-03: Kondisi kunci elektrik sewaktu dilakukan pengujian penutupan Sakelar Pemisah Jalur (*Disconnecting Switch Line Close / DSL C*) disajikan secara mendetail pada gambar 4.18.



Gambar 4. 18 Hasil Pengujian DS Line Close

- L-04: Dokumentasi pengujian simulasi program pada saat perintah penutupan Pemutus Tenaga Tegangan Tinggi Jalur (*Circuit Breaker Line High Voltage Close / CBL HV C*) aktif diperlihatkan pada gambar 4.19.



Gambar 4. 19 Hasil Pengujian CB Close Bay line

B. Urutan De-Energize Normal

- L-05: Gambar 4.20 menampilkan potongan diagram tangga untuk pengujian instruksi pembukaan Pemutus Tenaga Tegangan Tinggi Jalur (*Circuit Breaker Line High Voltage Open / CBL HV O*).



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 20 Hasil Pengujian CB Open Bay line

- L-06: Rangkaian logika kendali PLC pada saat dilakukan pengujian pembukaan Sakelar Pemisah Jalur (*Disconnecting Switch Line Open / DSL O*) dapat diacu pada gambar 4.21.



Gambar 4. 21 Hasil Pengujian DS Line Open Bay line

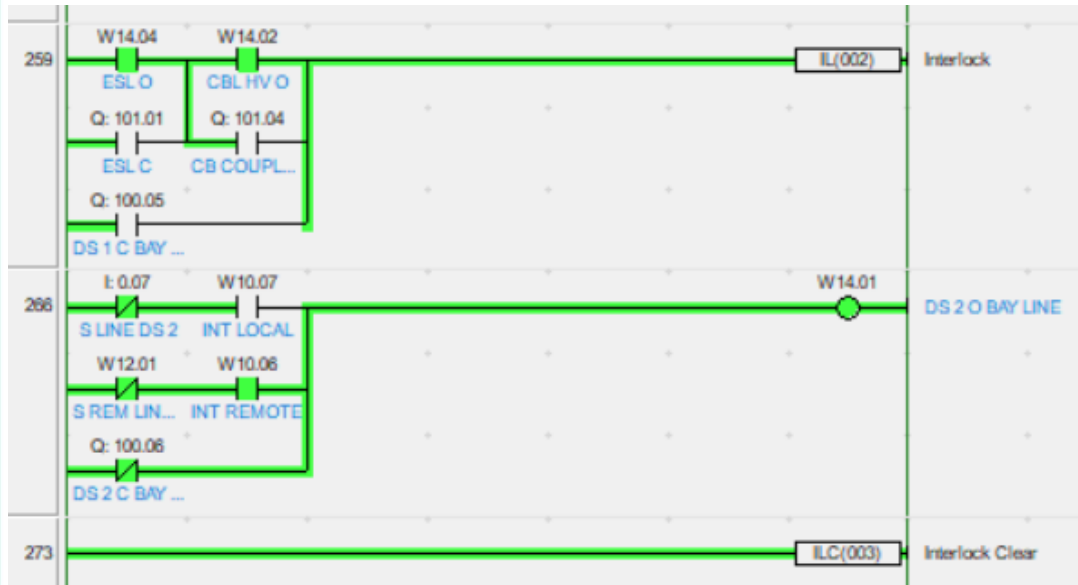
- L-07: Alur logika interlock program sewaktu instruksi pembukaan Sakelar Pemisah 2 pada sisi jalur bay (*Disconnecting Switch 2 Open Bay Line / DS 2 O BAY LINE*) dieksekusi tertera pada gambar 4.22.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 22 Hasil Pengujian DS 2 Open Bay line

C. Operasi Pembumian

- L-08: Pengujian terhadap sistem kunci aman pada saat penutupan Sakelar Pembumian Jalur (*Earthing Switch Line Close / ESL C*) ditunjukkan oleh gambar 4.23.



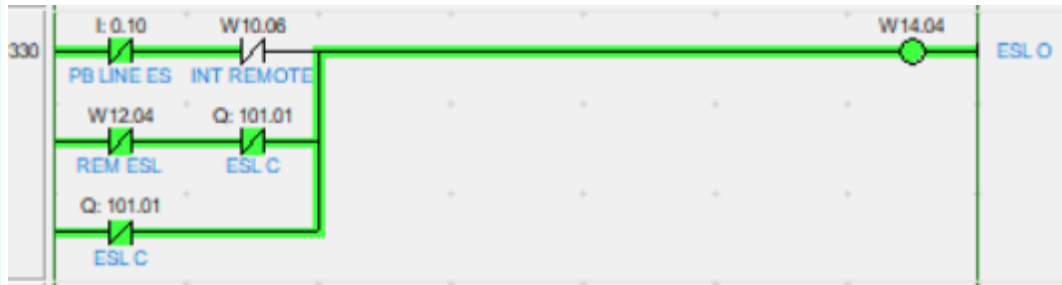
Gambar 4. 23 Hasil Pengujian ES Close Bay line

- L-09: Gambar 4.24 memperlihatkan tampilan diagram tangga saat pengujian fungsi pembukaan Sakelar Pembumian Jalur (*Earthing Switch Line Open / ESL O*).



Hak Cipta :

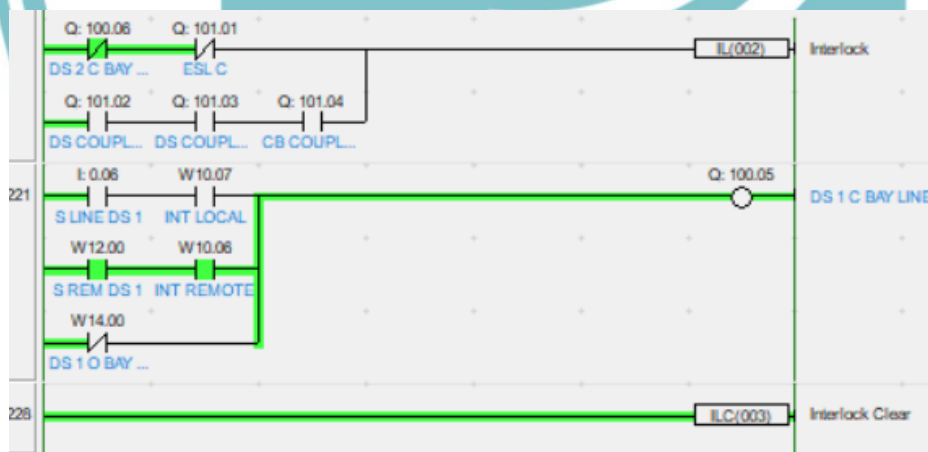
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 24 Hasil Pengujian ES Open Bay line

D. Skenario Terblokir

- L-10: Rangkaian pengujian logika penutupan DS 1 C BAY LINE dalam berbagai skenario alternatif disajikan secara detail pada Gambar 4.25. Visualisasi tersebut membagi alur logika menjadi beberapa gerbang pengondisian ulang, yang berfungsi untuk memverifikasi status peralatan terkait (seperti *Ground Switch* atau *Circuit Breaker*) sebelum sinyal *Close* dikirim ke motor penggerak DS 1. Hal ini dilakukan untuk menjamin bahwa kondisi alternatif yang diterapkan tidak melanggar aspek keselamatan kerja personil dan keamanan instalasi penyaluran.



Gambar 4. 25 Hasil Pengujian Mal Operasi DS 1 Close Bay line

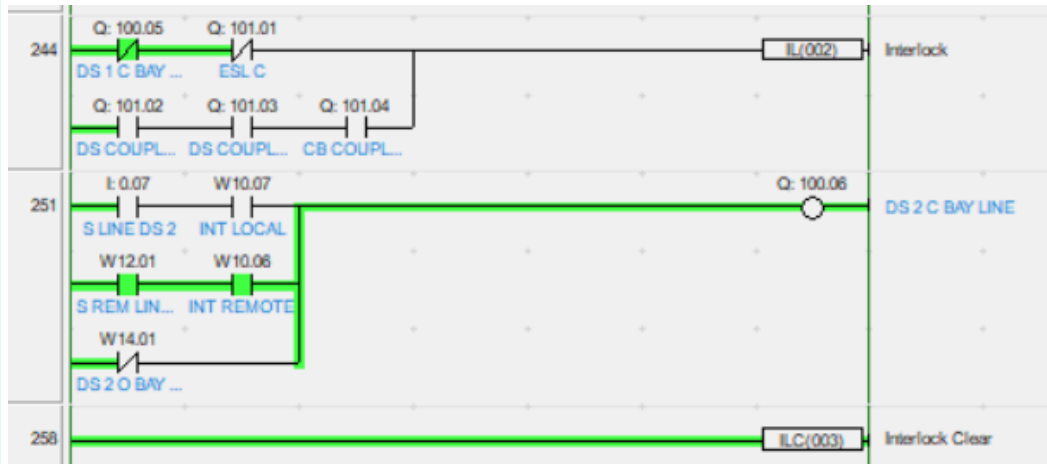
- L-11: Rangkaian logika diagram tangga saat pengujian instruksi penutupan Sakelar Pemisah 2 pada sisi jalur bay (*Disconnecting Switch 2 Close Bay Line / DS 2 C BAY LINE*) ditunjukkan oleh gambar 4.26.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

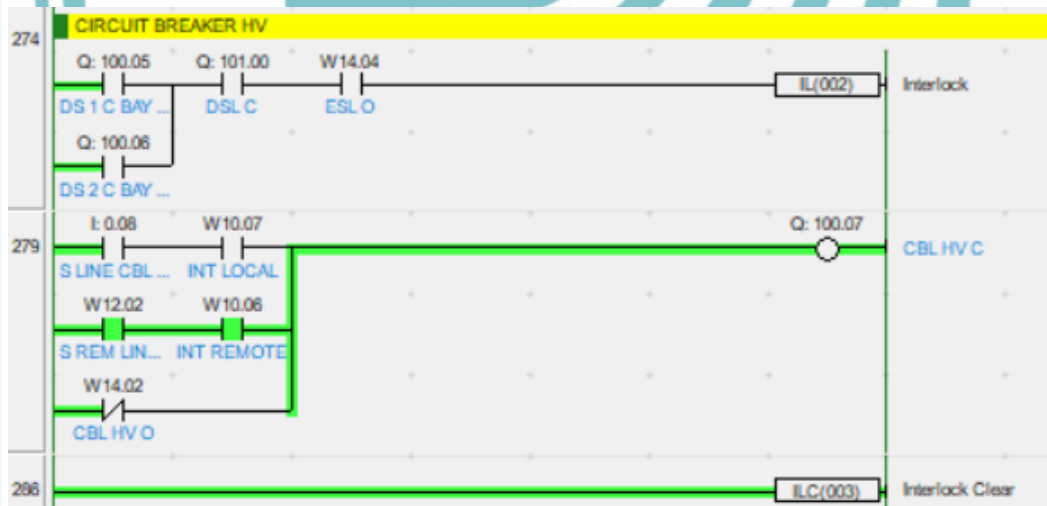
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 26 Hasil Pengujian Mal Operasi DS 2 Close Bay Line

- L-12: Dokumentasi pengujian simulasi program pada saat perintah penutupan Pemutus Tenaga Tegangan Tinggi Jalur (*Circuit Breaker Line High Voltage Close / CBL HV C*) aktif diperlihatkan pada gambar 4.27.



Gambar 4. 27 Hasil Pengujian Mal Operasi CB Close Bay Line

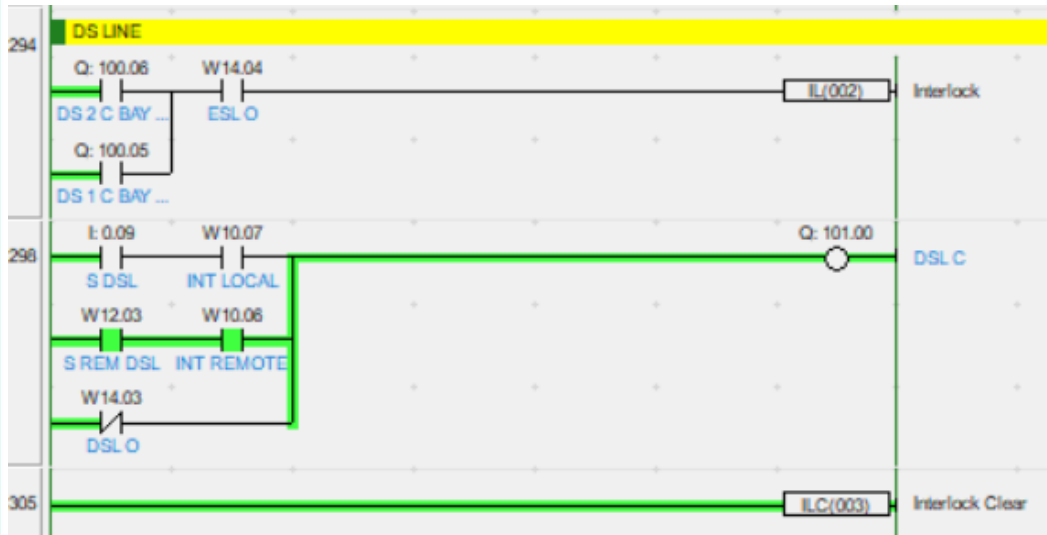
- L-13: Kondisi kunci elektrikalsewaktu dilakukan pengujian penutupan Sakelar Pemisah Jalur (*Disconnecting Switch Line Close / DSL C*) disajikan secara mendetail pada gambar 4.28.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

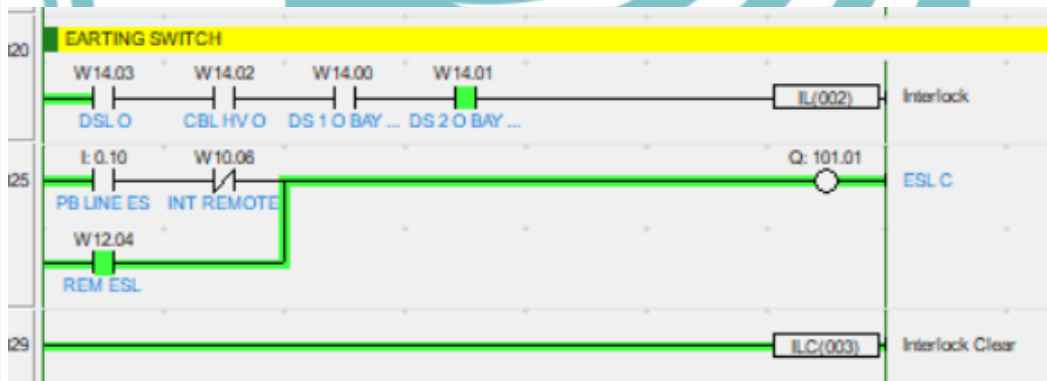
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 28 Hasil Pengujian Mal Operasi DS Line Close Bay Line

- L-14: Pengujian terhadap sistem kunci aman pada saat instruksi penutupan Sakelar Pembumian Jalur (*Earthing Switch Line Close / ESL C*) dieksekusi ditunjukkan oleh gambar 4.29.



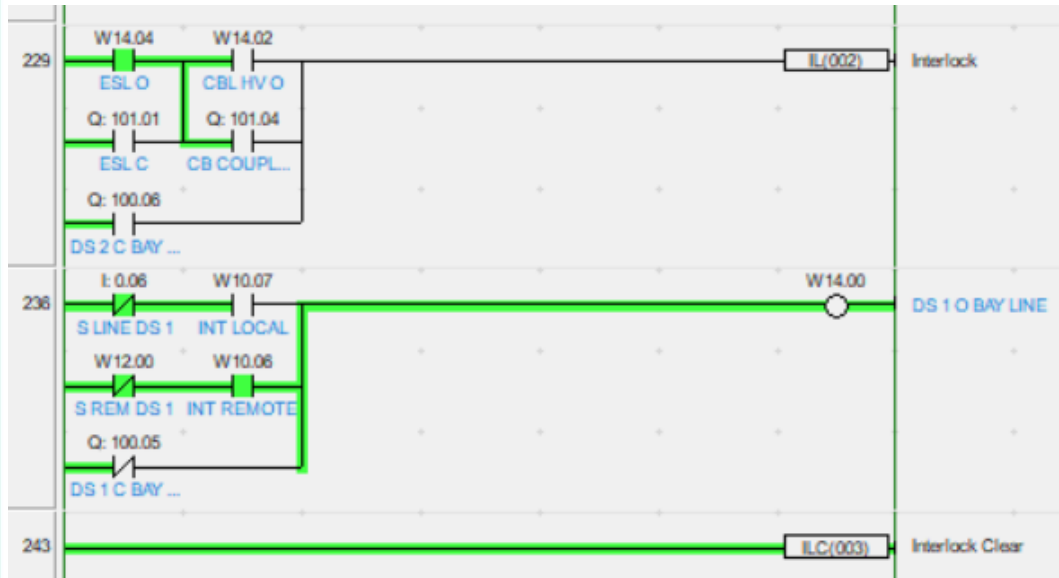
Gambar 4. 29 Hasil Pengujian Mal Operasi ES Close Bay Line

- L-15: Alur logika interlock program sewaktu pengujian fungsi pembukaan Sakelar Pemisah 1 pada sisi jalur bay (*Disconnecting Switch 1 Open Bay Line / DS 1 O BAY LINE*) dapat diacu pada gambar 4.30.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 30 Hasil Pengujian Mal Operasi DS 1 Open Bay Line

4.4.4 Analisa Hasil Pengujian

Berdasarkan teknis terperinci data pengujian sirkuit diagram tangga (*ladder diagram*) pada Gambar dengan analisis data seperti berikut:

A. Urutan Energize Normal

- L-01 (Close DS1): Logika interlok pada baris ini disusun menggunakan kontak *Normally Close* (NC) dari DS2 C BAY LINE (alamat Q:100.06), agar kedua sakelar pemisah busbar tersebut tidak bisa *close* bersamaan, kontak *Normally Close* (NC) dari ESL C (alamat Q:101.01), agar DS1 tidak bisa dioperasikan ketika *Earth Switch* dalam posisi *Close*, serta kontak paralel dari kombinasi sekuens *Bay Coupler* (Q:101.02, Q:101.03, Q:101.04). Ketika perintah menutup diberikan oleh operator, kondisi kontak interlok sekunder terpenuhi sehingga alamat *output* Q:100.05 berstatus Aktif. Karena pada kondisi awal parameter seluruh rangkaian berada dalam status *Open*, kontak-kontak NC dari peralatan proteksi tersebut tidak aktif sehingga tetap berada dalam kondisi tertutup (menyambung).
- L-02 (Close DS2): Logika interlok pada baris ini disusun menggunakan kontak *Normally Close* (NC) dari DS1 C BAY LINE (alamat Q:100.05), agar kedua DS bus tidak bisa masuk bersamaan pada kondisi normal, kontak *Normally Close* (NC) dari ESL C (alamat Q:101.01), agar DS2 tidak bisa



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

dioperasikan ketika *Earth Switch* penyulang aktif menutup, serta kontak paralel dari interlok *Bay Coupler*. Ketika perintah menutup diberikan oleh operator, kondisi kontak interlok sekunder pada diagram tangga (*ladder diagram*) telah terpenuhi sepenuhnya sehingga alamat *output* Q:100.06 berstatus Aktif.

- L-03 (Close DS Line): Logika interlok pada baris ini disusun menggunakan kontak *Normally Open* (NO) dari sakelar pemisah busbar (DS 2 C Bay Line atau DS 1 C Bay Line) sebagai syarat utama jalur hulu wajib mengunci salah satu rel daya, serta kontak *Normally Close* (NC) dari ESLO (alamat W:14.04). Karena pada pengujian sebelumnya parameter sakelar busbar telah sukses beralih ke status *Close*, kontak NO dari peralatan tersebut menjadi aktif sehingga berubah menjadi kondisi tertutup (menyambung). Ketika perintah menutup diberikan oleh operator, kondisi kontak interlok sekunder terpenuhi sehingga alamat *output* Q:101.00 berstatus Aktif.

B. Urutan De-Energize Normal

- L-04 (Open CB Line): Pada baris ini disusun tidak menggunakan logika interlok karena status *Open* pemutus tenaga tidak memandang status peralatan yang lain. Langkah awal pembebasan beban dilakukan dengan memutus aliran utama sirkuit transmisi, yang dibuktikan oleh aktifnya *internal relay* pembuka pada alamat W14.02. Pemutusan ini aman dilakukan dalam kondisi berbeban karena menggunakan media pemadam busur api internal *Circuit Breaker*.
- L-05 (Open DS Line): Setelah pemutus tenaga mendapatkan status *Open*, pembukaan sakelar pemisah hantaran berhasil dieksekusi melalui aktifnya memori internal register W14.03. Eksekusi pelepasan isolasi fisik sirkuit ini diizinkan oleh sistem karena status pengunci pada kontak NC CBL HV C (alamat Q:100.07) dan kontak DSL C (alamat Q:101.00) telah mendeteksi posisi tidak berbeban secara valid.
- L-06 (Open DS 2): Pelepasan isolasi fisik pada sakelar pemisah busbar menuju kondisi terbuka penuh berhasil divalidasi dengan aktifnya alamat



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

memori W14.01. Logika interlok pada baris pembukaan ini diizinkan terbuka oleh sistem PLC karena status kontak penanda dari pemutus tenaga (CBL HV O / W14.02) dan sirkuit interlok jala paralel lainnya telah memastikan pemutusan arus utama berada dalam kondisi aman.

C. Operasi Pembumian (Earth Switch)

- L-07 (Close ES1): Pemasukan sakelar pentanahan pengaman kerja hantaran berhasil mengaktifkan luaran mekanis pada alamat koil Q:101.01. Logika interlok tersebut aktif dengan syarat kontak NC dari DSLO, CBL HV O, DS1O BAY, dan DS2O BAY seluruhnya berada dalam posisi terpenuhi (tersambung), karena operasi *ES Close* murni ditujukan untuk proses pemeliharaan instalasi penyulang yang sudah tidak bertegangan.
- L-08 (Open ES1): Pelepasan kembali pisau pentanahan sebelum sistem dikembalikan ke mode operasi normal berhasil memicu keaktifan kontrol pada alamat Q:10.05, memutus hubungan sirkuit utama ke tanah secara aman.

D. Skenario Terblokir (Mal-Operasi / Safety Test)

- L-09 (Mal-operasi Close DS1): Saat dipaksa melakukan penutupan di luar prosedur, status output terdeteksi (X) dengan keterangan *block interlock* pada alamat Q:100.00. Ini terjadi karena kontak NC (*Normally Close*) dari sistem proteksi lain memutus kontinuitas arus instruksi dalam *ladder diagram*.
- L-10 (Mal-operasi Close DS2): Perintah paksa untuk memasukkan sakelar pemisah Bus B ditolak secara instan oleh program PLC, ditandai dengan kegagalan aktif pada register Q:100.06. Logika pengunci memblokir perintah operator guna menghindari insiden hubung singkat akibat adanya pisau pentanahan yang masih menempel di jalur hantaran.
- L-11 (Mal-operasi Close PMT): Instruksi ilegal untuk memasukkan pemutus tenaga utama diblokir total pada register Q:100.07. Sistem mendeteksi adanya prasyarat kontak NO dari DS 1 C BAY atau DS 2 C BAY yang belum terpenuhi secara valid (sirkuit pemisah masih terbuka), sehingga koil



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

output tetap terkunci mati demi mencegah masuknya tegangan secara anomali.

- L-12 (Mal-operasi Close DS Line): Pemaksaan penutupan sakelar pemisah hantaran udara mengalami kegagalan eksekusi pada alamat Q:101.00. Sirkuit diagram tangga memotong aliran kendali karena mendeteksi bahwa parameter sakelar pemisah sisi hulu belum beralih status ke posisi *Close*.
- L-13 (Mal-operasi Close ES): Tindakan berbahaya berupa memasukkan pisau pentanahan saat jalur dinilai belum aman atau bertegangan berhasil direkam oleh program pada alamat *output* Q:101.01. Blokade ini terjadi karena kontak internal mendeteksi status peralatan utama penyulang belum *Open* sempurna, yang mana sangat krusial guna mengeliminasi potensi insiden hubung singkat fasa-ke-tanah secara langsung.
- L-14 (Mal-operasi Open DS 1/2): Ketika sirkuit mendeteksi adanya aliran arus aktif (berbeban), perintah untuk membuka paksa sakelar pemisah busbar diblokir secara mutlak pada alamat internal W14.00. Pengunci interlok mengamankan pisau mekanis agar tidak terbuka selama *Circuit Breaker* belum memadamkan busur api utama (*anti-switching on load*) demi mencegah terjadinya ledakan busur api destruktif di lapangan.

4.5 Pengujian Validasi Logika Interlock On-Load Transfer

4.5.1 Deskripsi Pengujian

Pengujian fungsionalitas sistem interlok pada skenario *On-Load Bus Transfer* dilakukan secara komprehensif untuk memvalidasi performa logika pengunci paralel yang telah ditanamkan ke dalam CPU PLC Omron CP2E-N40DR-A. Pengujian ini ditujukan untuk memastikan keandalan sistem dalam memitigasi risiko kesalahan operasi manual (*human error*) oleh operator gardu induk ketika memindahkan beban sirkuit dari satu busbar ke busbar lainnya tanpa melakukan pemadaman tegangan. Komponen utama yang dilibatkan dalam pengujian rangkaian interkoneksi



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

ini mencakup perangkat *Bay Coupler* yaitu *Circuit Breaker Coupler* (PMT *Coupler*), *Disconnecting Switch Coupler* (DS1 *Coupler* di rel Bus A, DS2 *Coupler* di rel Bus B), serta komponen pemilih rel pada *Bay Transformator* (DS1 *Trafo* dan DS2 *Trafo*). Melalui simulasi hantaran data ini, unjuk kerja program diuji apakah mampu memberikan izin akses *bypass* paralel ketika kondisi penyelarasan tegangan antabusbar terpenuhi secara aman oleh *Bay Coupler*, atau melakukan pemblokiran instruksi seketika saat mendeteksi urutan manuver pemisahan beban secara ilegal (*switching on load*) tanpa adanya jembatan sinkronisasi yang valid.

4.5.2 Prosedur Pengujian

Berikut adalah prosedur pengujian sistem interlok untuk skenario *On-Load Transfer* yang diselaraskan secara persis dengan struktur kalimat, poin teknis, dan gaya bahasa dari contoh prosedur yang kamu berikan:

1. Mengaktifkan CX-Programmer dan menghubungkan stasiun kerja komputer ke PLC Omron CP2E-N40DR-A hingga berstatus *Work Online* dalam *Monitor Mode*.
2. Membuka lembar sub-program seksi BAY_COUPLER dan BAY_TRAFO.
3. Mensimulasikan mode kendali dengan mengubah status bit *Remote* atau *Local* pada relasi input kendali terkait *coupler* dan penyulang.
4. Urutan Pemasukan Bay Coupler dan Paralel Busbar (C-04 s.d C-06 Coupler): Posisikan sirkuit awal *Bay Coupler* terbuka penuh. Masukkan jembatan paralel dengan memberikan perintah *Close* secara berurutan mulai dari DS 1 Coupler (sisi Bus A), kemudian DS 2 Coupler (sisi Bus B), dan diakhiri dengan menutup CB Coupler. Amati pemberian izin akses (✓) di setiap tahapan hingga beda potensial antarbus menjadi nol.
5. Urutan Eksekusi Transfer Beban Trafo: Posisikan *Bay Transformator* awalnya menyuplai dari Bus A (DS 1 Trafo dan PMT Trafo dalam status CLOSE). Masukkan sakelar pemisah Bus B dengan memberikan perintah *Close* pada DS 2 Trafo. Amati bahwa logika *bypass* paralel meloloskan instruksi (✓) karena jembatan kopling busbar telah aktif.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

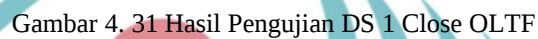
6. Urutan Pelepasan Bus Asal (Penormalan): Setelah beban trafo terparalel aman, lakukan pelepasan isolasi dari rel daya asal dengan memberikan perintah *Open* pada DS 1 Trafo. Amati proses pelepasan di bawah beban (*on-load*) sukses diizinkan tanpa memicu pemadaman daya sisi sekunder.
7. Urutan Pelepasan Sekuens Coupler (C-05 s.d C-07 Coupler): Kembalikan independensi operasional rel daya setelah transfer selesai. Berikan perintah *Open* secara berurutan mulai dari CB Coupler untuk memutus paralel arus utama, dilanjutkan dengan perintah *Open* pada DS 1 Coupler, dan diakhiri pada DS 2 Coupler.
8. Skema Tolak Jala / Mal-Operasi (*Safety Test* Skenario Paralel): Lakukan uji stres dengan sengaja melanggar urutan pemindahan beban. Langkah ini mencakup pemaksaan *Close* DS 2 Trafo ketika CB Coupler masih *Open* (mencoba paralel bus secara ilegal), pemaksaan *Open* DS 1 Trafo sebelum DS 2 Trafo masuk mengunci, serta pemaksaan *Open* salah satu DS *Coupler* ketika CB Coupler masih tertutup memikul arus sirkulasi (*switching on load*). Amati respon proteksi (X) dari sistem berupa pemblokiran instruksi.
9. Mencatat perubahan nilai status kontak pada jendela *Watch Window*.

4.5.3 Data Hasil Pengujian

A. Urutan *On-Load Transfer Bay Trafo* ke BUS 2

- C-01: Rangkaian logika diagram tangga saat pengujian instruksi penutupan Sakelar Pemisah 1 (*Disconnecting Switch 1 Close / DS 1 C*) ditunjukkan oleh gambar 4.31.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



- Gambar 4. 32 Hasil Pengujian CB HV Close OLTF

- C-03: Dokumentasi pengujian simulasi program pada saat perintah penutupan Pemutus Tenaga Tegangan Rendah (*Circuit Breaker Low Voltage Close / CB LV C*) aktif tertera pada gambar 4.33.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

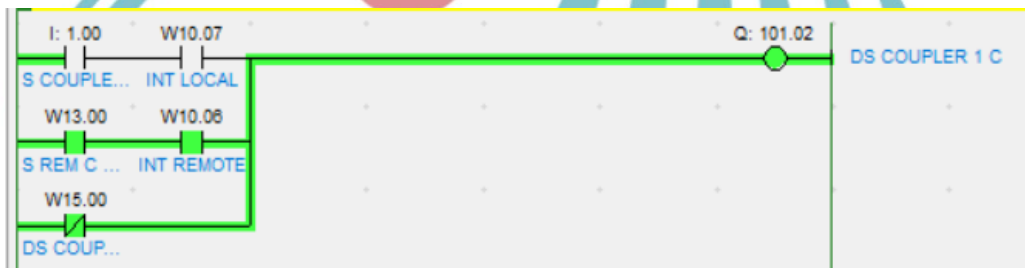
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



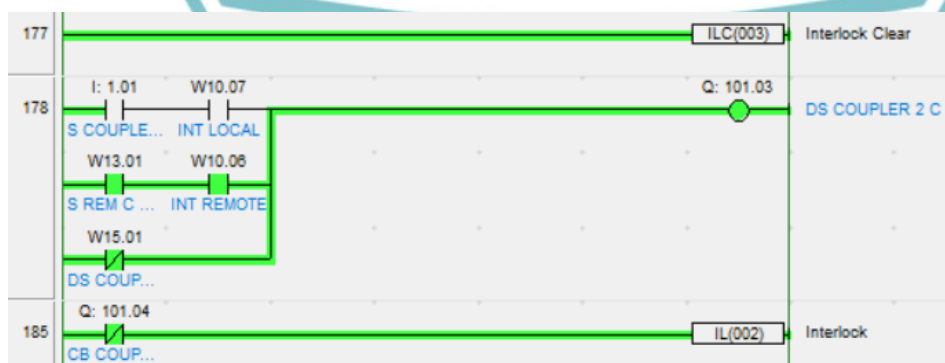
Gambar 4. 33 Hasil Pengujian CB LV Close OLTf

- C-04: Kondisi kunci elektrik sewaktu dilakukan pengujian penutupan Sakelar Pemisah Kopling 1 (*Disconnecting Switch Coupler 1 Close / DS COUPLER 1 C*) dapat diacu pada gambar 4.34.



Gambar 4. 34 Hasil Pengujian DS 1 Close Bay Coupler OLTf

- C-05: Alur logika interlock program sewaktu instruksi penutupan Sakelar Pemisah Kopling 2 (*Disconnecting Switch Coupler 2 Close / DS COUPLER 2 C*) dieksekusi disajikan secara mendetail pada gambar 4.35. Sekuens program menunjukkan bahwa perintah *close* dapat diterima melalui jalur lokal maupun *remote*, dengan syarat pengaman tambahan berupa interlock dari posisi mekanis sakelar pemisah (DS) dan pemutus tenaga (CB) terkait yang harus terpenuhi sebelum koil instruksi aktif.



Gambar 4. 35 Hasil Pengujian DS 2 Close Bay Coupler OLTf



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

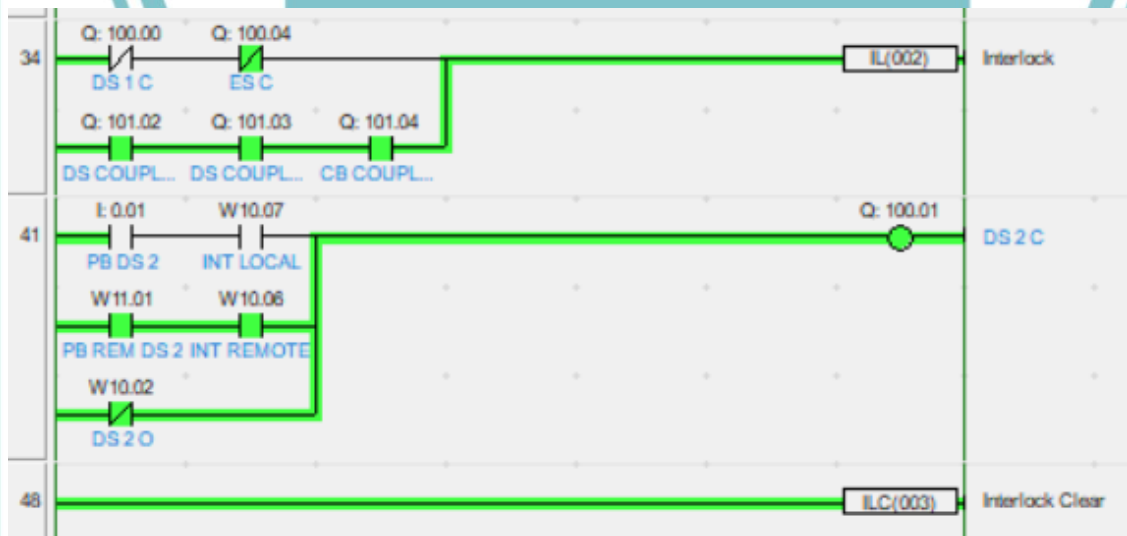
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- C-06: Gambar 4.36 menampilkan potongan diagram tangga untuk pengujian instruksi penutupan Pemutus Tenaga Kopling (*Circuit Breaker Coupler Close / CB COUPLER C*).



Gambar 4. 36 Hasil Pengujian CB Close Bay Coupler OLTF

- C-07: Pengujian terhadap fungsi kendali PLC pada saat perintah penutupan Sakelar Pemisah 2 (*Disconnecting Switch 2 Close / DS 2 C*) aktif diperlihatkan pada Gambar 4.37. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa logika program PLC dapat merespons instruksi penutupan dengan tepat dan aman. Melalui visualisasi diagram tangga (*ladder diagram*) atau status I/O pada gambar tersebut, dapat diamati bahwa sinyal perintah berhasil dieksekusi oleh PLC untuk mengaktifkan koil kontaktor atau aktuatur terkait, menandakan bahwa fungsi interlok dan kendali DS 2 berada dalam kondisi normal.



Gambar 4. 37 Hasil Pengujian DS 2 Close OLTF

B. Urutan Penormalan setelah *On-Load Transfer*

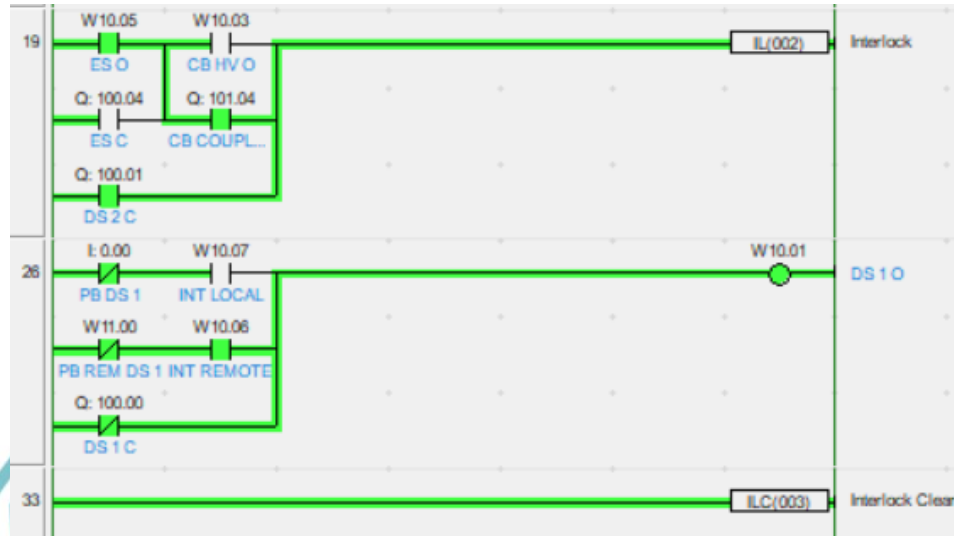


© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

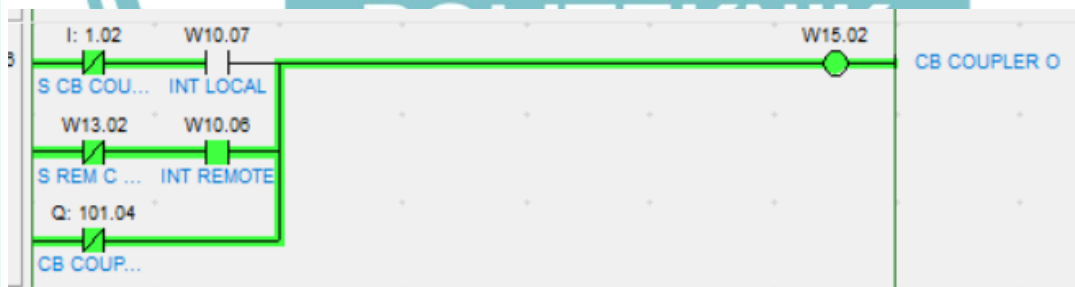
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- C-08: Visualisasi rangkaian diagram tangga saat pengujian fungsi pembukaan Sakelar Pemisah 1 (*Disconnecting Switch 1 Open / DS 1 O*) ditunjukkan oleh gambar 4.38.



Gambar 4. 38 Hasil Pengujian DS 1 Open OLTF

- C-09: Alur pengujian logika interlock pada saat instruksi pembukaan Pemutus Tenaga Kopling (*Circuit Breaker Coupler Open / CB COUPLER O*) dikirimkan dapat dilihat pada gambar 4.39.



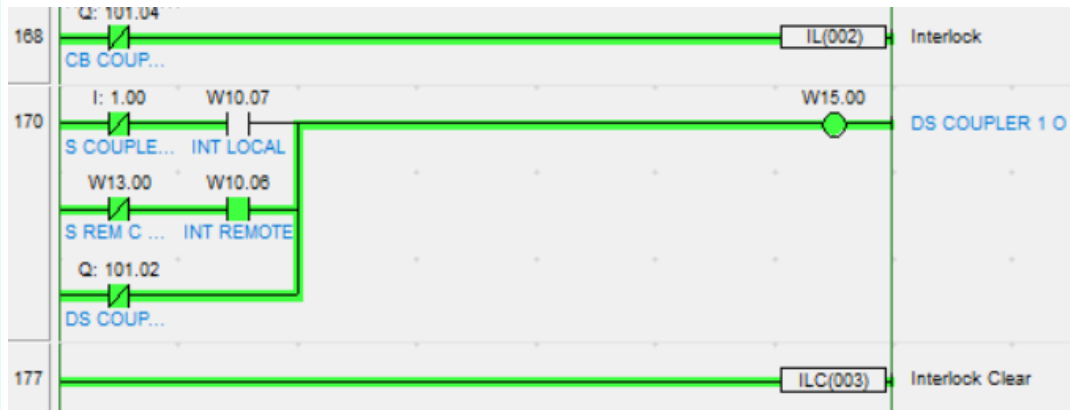
Gambar 4. 39 Hasil Pengujian CB Open Bay Coupler OLTF

- C-10: Gambar 4.40 memperlihatkan tampilan simulasi status program saat pengujian instruksi pembukaan Sakelar Pemisah Kopling 1 (*Disconnecting Switch Coupler 1 Open / DS COUPLER 1 O*).



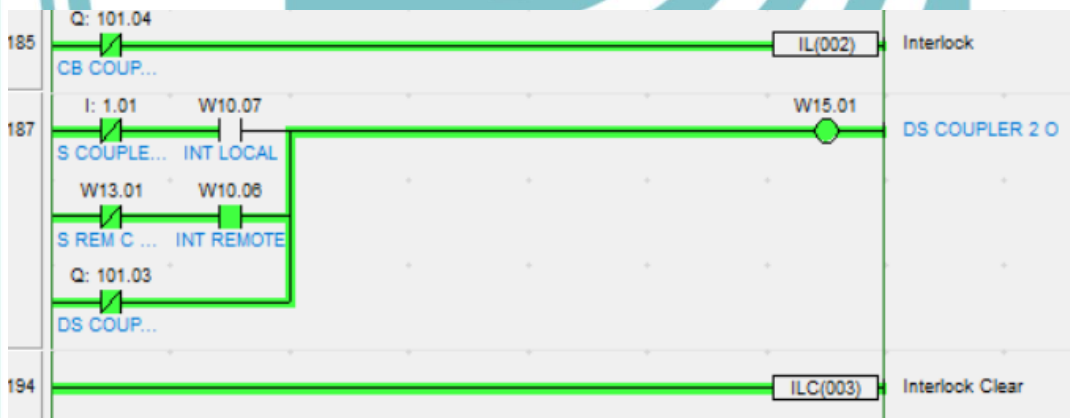
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 40 Hasil Pengujian DS 1 Open Bay Coupler OLTF

- C-11: Hasil pengujian simulasi program PLC untuk instruksi pembukaan Sakelar Pemisah Kopling 2 (*Disconnecting Switch Coupler 2 Open / DS COUPLER 2 O*) dapat dilihat pada gambar 4.41. Pada *rung* program tersebut, instruksi pembukaan dapat dieksekusi melalui perintah lokal maupun *remote* dengan pengaman *interlock* utama berupa kondisi *Normally Closed* (NC).



Gambar 4. 41 Hasil Pengujian DS 2 Open Bay Coupler OLTF

4.5.4 Analisa Hasil Pengujian

Berdasarkan teknis terperinci data pengujian sirkuit diagram tangga (*ladder diagram*) pada Gambar dengan analisis data seperti berikut:

A. Urutan Energize Normal Awal Bay Transformator

- C-04 (Close DS 1 Trafo): Logika interlok hulu pada sirkuit masuknya pemisah utama trafo disusun menggunakan kontak NC dari DS2 C (Q:100.01) dan kontak NC dari sakelar pembumian ES C (Q:100.04). Hal ini ditujukan agar kedua DS tidak saling bertabrakan pada kondisi normal dan mencegah



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

pengisian tegangan ke bumi. Karena seluruh sirkuit awal dinyatakan terbuka (*open*), kontak NC proteksi mengalirkan arus instruksi, menghasilkan keluaran alamat *output* Q:100.00 berstatus Aktif.

- C-02 (Close CB HV): Logika interlok pada baris ini dikunci mutlak menggunakan syarat kontak NO dari pemisah hulu (DS1 C dengan alamat Q:100.00) yang wajib menutup terlebih dahulu, serta jaminan NC dari kontak proteksi W10.05 dan ES O. Ketika operator menekan tombol *Close*, sirkuit interlok terpenuhi sempurna sehingga alamat *output* pemutus tenaga sisi hulu Q:100.02 dinyatakan Aktif untuk memicu proses *energize* trafo tanpa beban.
- C-03 (Close CB LV): Logika interlok baris hilir ini dipasang seri menggunakan kontak NO pembatas milik CB HV C (Q:100.02) sebagai interlok kelestrikan utama. Pemutus tenaga sisi tegangan rendah tidak akan diizinkan masuk sebelum sisi tegangan tinggi terbukti bertegangan demi mengeliminasi bahaya arus *inrush* ekstrem dan *back-feeding*. Hasil simulasi menunjukkan kondisi interlok terpenuhi penuh dan mengaktifkan alamat *output* Q:100.03 berstatus Aktif.

B. Urutan De-Energize Normal

- C-04 Trafo (Open DS 1 Trafo): Logika interlok pada baris ini disusun menggunakan kontak bantu guna mengizinkan pemisahan fisik dari rel asal ketika jembatan pengalir daya pengganti dipastikan stabil. Eksekusi pembukaan di bawah beban (*on-load*) ini dinyatakan berhasil dengan aktifnya *internal relay* pemutus pada alamat W10.01. Operasi ini aman karena arus beban trafo telah ditopang secara penuh oleh jalur konduktif DS 2 Trafo yang dimasukkan pada sekuens sebelumnya.
- C-05 Coupler (Open CB Coupler): Langkah pelepasan sistem paralel antarbusbar diawali dengan memutuskan interkoneksi elektrik utama melalui pemutus tenaga *coupler*. Saat instruksi dikirim oleh operator, gerbang logika PLC langsung memicu keaktifan bit memori internal register W15.02



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

berstatus Aktif. Pembukaan ini menghentikan sirkulasi arus antar-rel secara instan melalui peredam busur api internal media *breaker*.

- C-06 Coupler (Open DS 1 Coupler): Setelah pemutus tenaga *coupler* dipas-tikan terbuka penuh (arus nol ampere), sekat isolasi fisik pada Busbar A dibebaskan. Logika interlok pada baris pembukaan ini meloloskan aliran perintah operator yang dibuktikan oleh aktifnya alamat memori internal W15.00 berstatus Aktif karena kondisi sirkuit hulu telah berada pada kon-disi tanpa beban (*off-load*) secara valid.
- C-07 Coupler (Open DS 2 Coupler): Penyelesaian pelepasan sekuens *Bay Coupler* guna mengembalikan independensi penuh masing-masing rel daya. Perintah pembukaan akhir pada pisau pemisah Busbar B berhasil divalidasi dengan beralihnya alamat memori internal register W15.01 menjadi status Aktif, menandakan keseluruhan proses transfer beban dinamis telah ram-pung secara aman.

C. Operasi Pembumian (Earth Switch)

- C-01 (Close DS1 Trafo): Logika interlok hulu pada sirkuit masuknya pem-isah utama trafo disusun menggunakan kontak NC dari DS2 C (Q:100.01) dan kontak NC dari sakelar pembumian ES C (Q:100.04). Karena seluruh sirkuit awal dinyatakan terbuka (*open*), kontak NC proteksi mengalirkan arus instruksi, menghasilkan keluaran alamat *output* Q:100.00 berstatus Ak-tif.
- C-02 (Close CB HV): Logika interlok pada baris ini dikunci mutlak menggunakan syarat kontak NO dari pemisah hulu (DS1 C dengan alamat Q:100.00) yang wajib menutup terlebih dahulu, serta jaminan NC dari kon-tak proteksi W10.05 dan ES O. Ketika operator menekan tombol *Close*, sir-kuit interlok terpenuhi sempurna sehingga alamat *output* pemutus tenaga sisi hulu Q:100.02 dinyatakan Aktif untuk memicu proses *energize* trafo tanpa beban.

- C-03 (Close CB LV): Logika interlok baris hilir ini dipasang seri menggunakan kontak NO pembatas milik CB HV C (Q:100.02) sebagai interlok kelestrikan utama. Hasil simulasi menunjukkan kondisi interlok ter-
penuhi penuh dan mengaktifkan alamat *output* Q:100.03 berstatus Aktif.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

