

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Elongasi dan Regangan Bahan

Proses penyambungan adalah merangkai dua konduktor yang terpisah menjadi satu rangkaian. Menyambung konduktor dengan selongsong penyambung tekan (*Compression sleeve*) merupakan salah satu cara proses penyambungan yang banyak digunakan dalam transmisi tenaga listrik.

Suatu bahan yang telah diproduksi menjadi berbentuk selongsong tersebut mempunyai beberapa sifat mekanis seperti kekuatan, kekerasan dan keuletan. Apabila bahan menerima gaya akan mengalami perubahan bentuk. Jika suatu gaya  $P$  bekerja pada selongsong penyambung tekan dengan luas penampang  $A$ , maka terjadi tegangan mekanis (*stress*) pada selongsong tersebut. Tegangan mekanis adalah gaya yang bekerja pada bahan per satuan luas, dan dirumuskan sebagai:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \dots(2.1)$$

dengan:

$\sigma$  : Tegangan mekanis yang terbagi rata.

$P$  : Beban yang dikenakan pada bahan.

$A$  : Luas penampang bahan.

Bila suatu selongsong lurus diberi beban tarik, selongsong tersebut akan bertambah panjang. Jumlah pertambahan panjang disebut regangan ( $\epsilon$ ) yaitu jumlah pertambahan panjang per satuan panjang, dan dirumuskan sebagai:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad \dots(2.2)$$

dengan:

$\epsilon$  : Regangan aksial.

$\delta$  : Elongasi.

$L$  : Panjang batang.

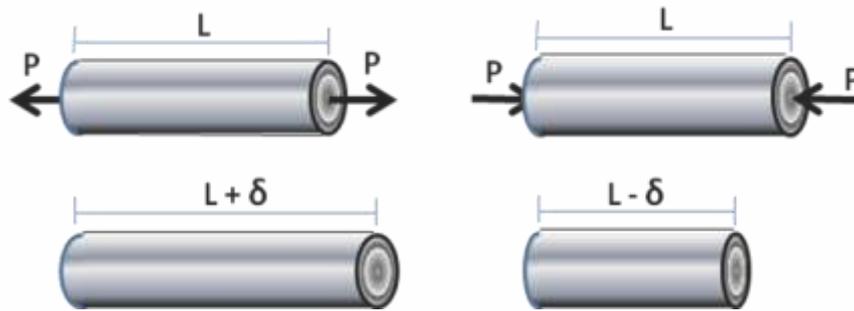
Untuk kondisi dimana tegangan mekanis berbanding lurus dengan regangan, dapat dirumuskan sebagai:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad \dots(2.3)$$

dengan E adalah modulus elastisitas (*Young's modulus*) bahan.

Dengan memasukan persamaan (2.1) dan (2.2) ke dalam persamaan (2.3), maka didapatkan persamaan untuk perubahan bentuk total dari selongsong yang dibebani secara aksial dengan beban tarik atau beban tekan.

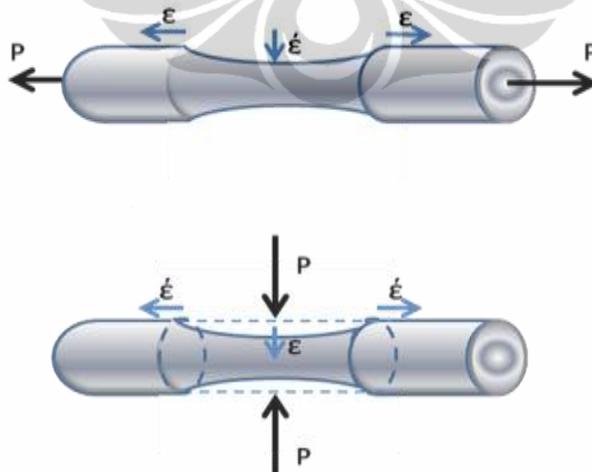
$$\delta = \frac{P \cdot L}{A \cdot E} \quad \dots(2.4)$$



Gambar 2.1: Elongasi Beban Tarik dan Beban Tekan pada Selongsong

Bila selongsong diberi beban tarik atau beban tekan, regangan yang terjadi tidak hanya dalam arah aksial ( $\epsilon$ ), tetapi juga dalam arah lateral ( $\epsilon'$ ). Kedua regangan tersebut saling berbanding lurus, sejauh dalam batas-batas hukum Hooke<sup>[3]</sup>, dan dikenal sebagai angka pembanding Poisson (*Poisson's ratio*) atau  $\mu$ .

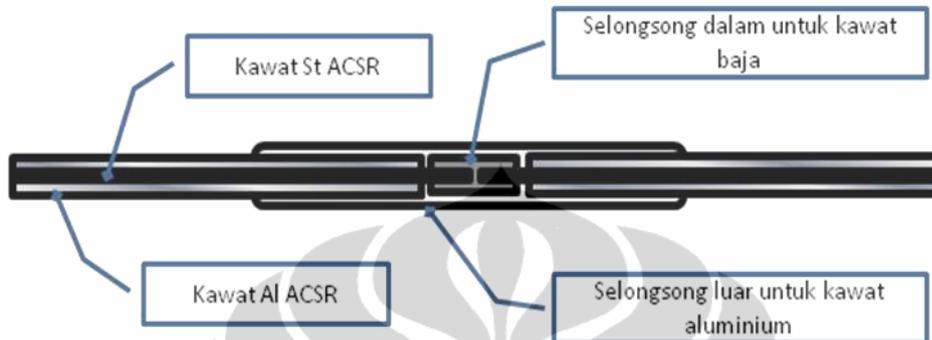
$$\mu = \frac{\epsilon'}{\epsilon} \quad \dots (2.5)$$



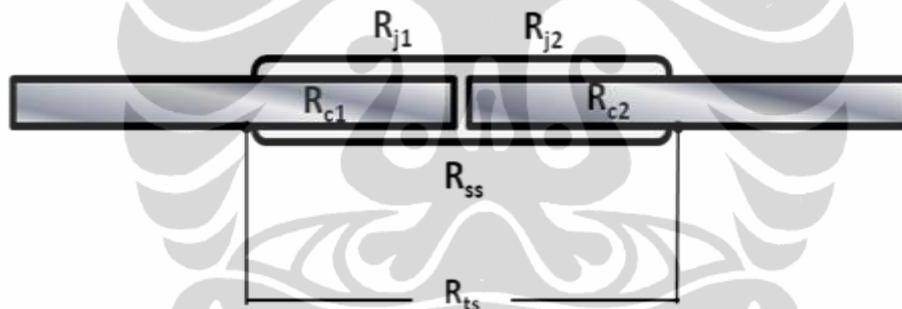
Gambar 2.2: Regangan Aksial dan Regangan Lateral

## 2.2 Hambatan Sambungan

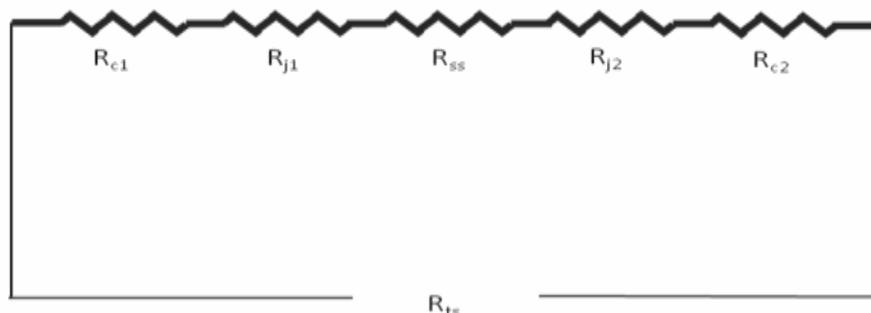
Rangkaian ekivalen dari contoh uji dapat digambarkan sebagai berikut:



(a) Sambungan konduktor ACSR dengan selongsong tekan



(b) Sambungan contoh uji



(c) Rangkaian ekivalen hambatan sambungan

Gambar 2.3: Sambungan Konduktor dan Rangkaian Ekivalen

Dari gambar 2.3 tersebut, maka:

$$R_{ts} = R_{c1} + R_{j1} + R_{ss} + R_{j2} + R_{c2} \quad \dots(2.6)$$

dengan:

$R_{ts}$  : Hambatan total sambungan.

$R_{c1}, R_{c2}$  : Hambatan bagian konduktor 1 dan 2 yang tersambung.

$R_{j1}, R_{j2}$  : Hambatan bidang kontak antara konduktor 1 dan 2 dengan selongsong.

$R_{ss}$  : Hambatan bagian selongsong yang tersambung.

dan:

$$R_{c1} = \rho_{c1} \frac{L_{c1}}{A_{c1}} \quad \dots(2.7)$$

$$R_{c2} = \rho_{c2} \frac{L_{c2}}{A_{c2}} \quad \dots(2.8)$$

$$R_{j1} = \rho_{j1} \frac{L_{j1}}{A_{j1}} \quad \dots(2.9)$$

$$R_{j2} = \rho_{j2} \frac{L_{j2}}{A_{j2}} \quad \dots(2.10)$$

$$R_{ss} = \rho_{ss} \frac{L_{ss}}{A_{ss}} \quad \dots(2.11)$$

Karena bagian konduktor dan bagian bidang kontak antara konduktor dengan selongsong yang tersambung dianggap sama, maka:

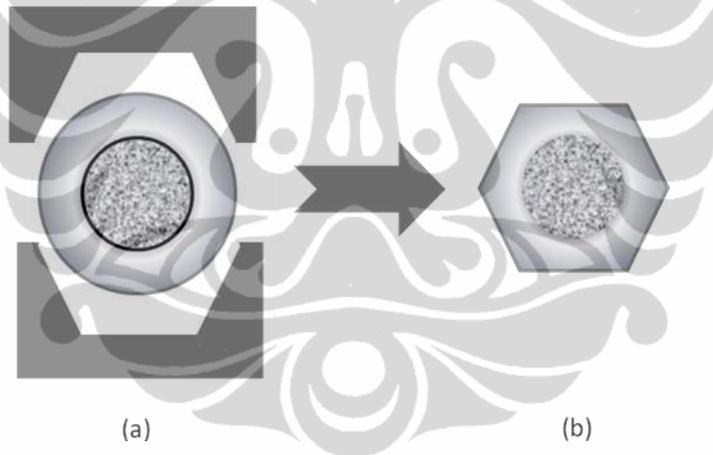
$$R_{c1} = R_{c2} = R_c \quad \dots(2.12)$$

$$R_{j1} = R_{j2} = R_j \quad \dots(2.13)$$

Sehingga persamaan (2.6) dapat disederhanakan menjadi:

$$R_{ts} = 2 \cdot \rho_c \frac{L_c}{A_c} + 2 \cdot \rho_j \frac{L_j}{A_j} + \rho_{ss} \frac{L_{ss}}{A_{ss}} \quad \dots(2.14)$$

Proses penyambungan dengan selongsong tekan dilakukan dengan menempatkan rangkaian konduktor dan selongsong ke dalam cetakan yang berbentuk segi enam sama sisi. Penekanan dilakukan pada beberapa bagian ruas di sepanjang selongsong.



Gambar 2.4: (a) Cetakan Penyambung Tekan; (b) Setelah Proses Penyambungan

Menurut persamaan (2.4) dan (2.5), setelah dilakukan pengerutan dengan mengenakan gaya tekan secara radial, maka akan terjadi elongasi pada selongsong tekan. Jika semua contoh uji mempunyai konduktor, selongsong tekan, dan dikenakan gaya tekan yang sama (kecuali urutan pelaksanaan pengerutan pada ruas-ruas selongsongnya dibuat berbeda, yang menyebabkan panjang bidang

tekannya berbeda), maka semua variabel dalam persamaan (2.14) dianggap konstan kecuali  $L_{ss}$ . Sehingga:

$$R_{ts} = cs1 + cs2 \cdot L_{ss} \quad \dots(2.15)$$

dengan:

$cs1, cs2$  : Konstanta hasil penyambungan.

$L_{ss}$  : Panjang sambungan pada selongsong tekan.

Persamaan (2.15) menunjukkan besarnya hambatan total sambungan merupakan fungsi dari panjang sambungan yang terbentuk.

### 2.3 Keseimbangan Temperatur

Jika arus listrik  $I$  mengalir melalui sambungan yang mempunyai hambatan  $R$ , maka terjadi rugi-rugi daya  $P$  yang dirumuskan dengan persamaan:

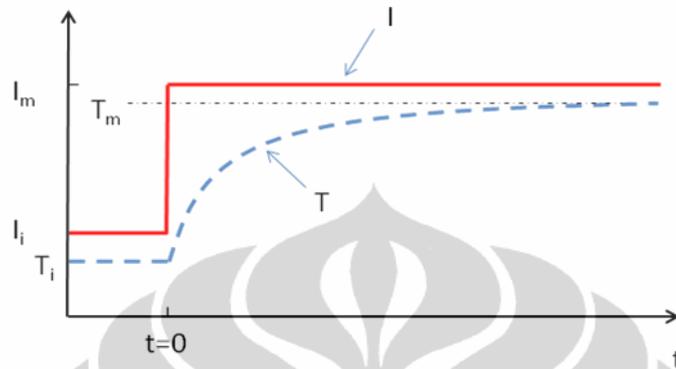
$$P = I^2 \cdot R \quad \dots(2.16)$$

Adanya rugi-rugi daya ini, yang didisipasikan dalam bentuk energi kalor, akan menaikkan temperatur sambungan. Semakin besar nilai hambatannya maka semakin tinggi pula kalor yang ditimbulkannya.

Grafik perubahan temperatur sambungan mengikuti perubahan arus ditampilkan sebagai hubungan temperatur – waktu oleh fungsi perubahan arus, seperti pada gambar 2.5.

Sesaat sebelum perubahan arus ( $t = 0^-$ ), temperatur sambungan tetap seperti temperatur setimbang awal ( $T_i$ ). Kemudian sesaat setelah kenaikan arus ( $t = 0^+$ ),

temperatur sambungan mulai naik akibat timbulnya kalor oleh rugi-rugi daya dalam sambungan.



Gambar 2.5: Hubungan Temperatur-Waktu oleh Fungsi Perubahan Arus

Kenaikan temperatur sambungan akan terus terjadi sampai tercapai temperatur setimbang yang baru ( $T_m$ ). Hubungan antara temperatur dan waktu yang menggambarkan keadaan transien sampai setimbang, dirumuskan dengan persamaan :<sup>[4]</sup>

$$\Delta T = T_m \cdot \left[ 1 - e^{\left(-\frac{t}{\tau_t}\right)} \right] \quad \dots(2.17)$$

dengan:

$\Delta T$  : Kenaikan temperatur.

$T_m$  : Temperatur setimbang akhir.

$t$  : Waktu

$\tau_t$  : Konstanta waktu termal

Bentuk grafik seperti itu dikenal sebagai grafik model persamaan laju pertumbuhan saturasi. Rumus umum persamaan tersebut adalah:<sup>[5]</sup>

$$y(x) = \frac{a \cdot x + b}{x + c} \quad \dots (2.18)$$

Jika variabel  $y$  dan  $x$  persamaan (2.18) diganti menjadi variabel temperatur  $T$  dan waktu  $t$ , maka:

$$T(t) = \frac{a \cdot t + b}{t + c} \quad \dots (2.19)$$

Sedangkan konstanta waktu termal adalah waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 63% dari keadaan setimbang. Nilai konstanta tersebut bergantung kepada hambatan dan kapasitas termal konduktor, serta dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:<sup>[4]</sup>

$$\tau_t = R_t \cdot C_t \quad \dots(2.20)$$

dengan

$\tau_t$  : Konstanta waktu termal

$R_t$  : Hambatan termal

$C_t$  : Kapasitas termal

Secara grafis, konstanta waktu termal dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:<sup>[6]</sup>

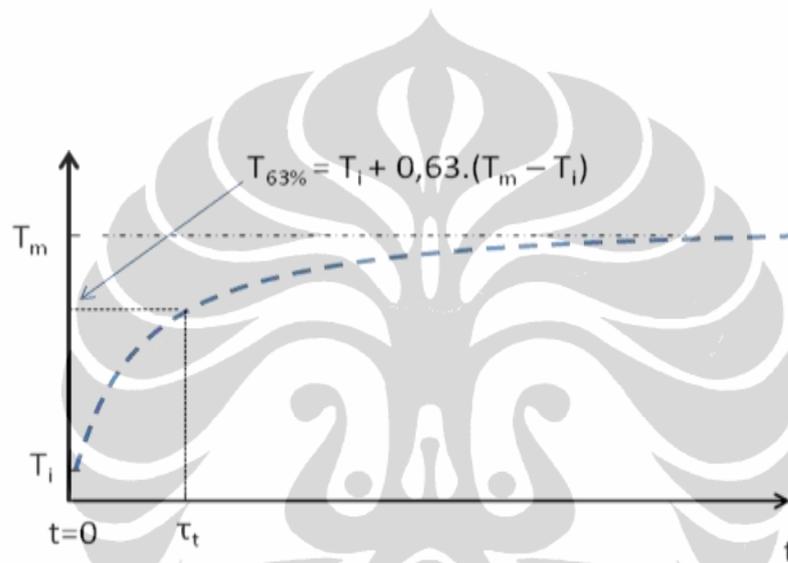
$$T_{63\%} = T_i + 0,63 \cdot (T_m - T_i) \quad \dots(2.21)$$

dengan:

$T_{63\%}$  : Temperatur pada 63% dari temperatur setimbang akhir.

$T_i$  : Temperatur mula

Selanjutnya nilai temperatur  $T_{63\%}$  tersebut dipotongkan ke grafik kenaikan temperaturnya untuk mendapatkan nilai konstanta waktu termal pada sumbu mendatar, seperti ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6: Konstanta Waktu Termal

# BAB III

## PENGUJIAN TEMPERATUR SAMBUNGAN SELONGSONG TEKAN DENGAN VARIASI TEKNIK PENYAMBUNGAN

### 3.1 Persiapan Contoh Uji

Sembilan selongsong tekan dibagi menjadi 3 kelompok uji. Masing-masing kelompok terdiri dari 3 contoh uji dan diberikan kode uji sesuai arah urutan penekanan yaitu (1) TU, untuk urutan penekanan dimulai dari bagian tengah ke arah masing-masing ujung selongsong, (2) UU, untuk penekanan dimulai dari satu ujung ke ujung lainnya dan (3) UT, untuk penekanan dimulai dari masing-masing ujung ke bagian tengah selongsong.

Bahan uji:

- a. Konduktor ACSR Leghorn : 18 potong @ 50 cm

Kawat terpilin dengan 7 inti kawat baja dan 12 kawat aluminium.

Diameter inti St dan Al : 2,69 mm

Luas penampang konduktor : 68 mm<sup>2</sup>

Diameter luar : 13,5 mm

Arus nominal<sup>[7]</sup> : 271 Ampere pada 75 °C

- b. Selongsong tekan (*compression splice*) : 9 unit

Merek	: Dervaux
Bahan	: Aluminium ( <i>Al alloy</i> )
Panjang	: 39 cm
Diameter luar	: 2,3 cm
Diameter dalam	: 1,40 cm

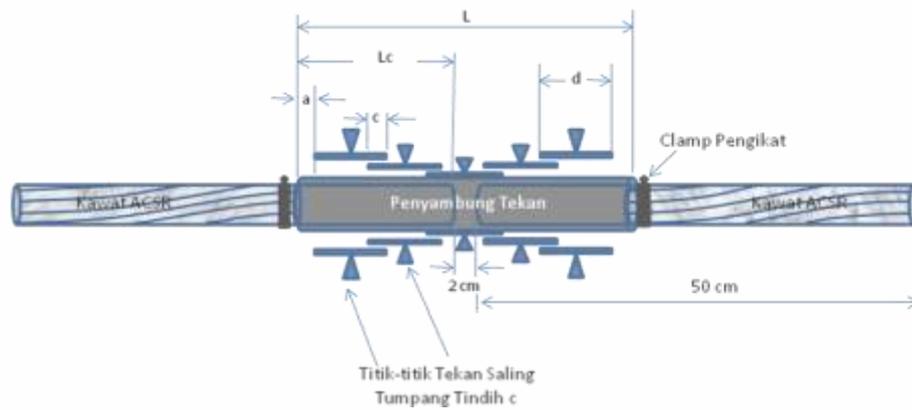


Gambar 3.1 : Selongsong Tekan dan Konduktor ACSR

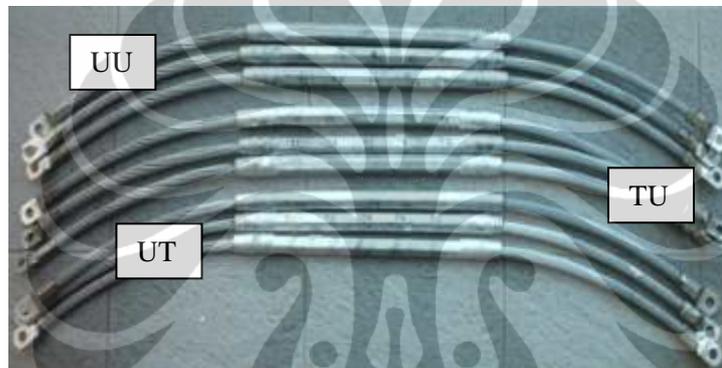
### 3.2 Proses Penyambungan

Tempat : PT PLN (Persero) P3B Jawa Bali Unit Pelayanan Transmisi Banten.

Setiap selongsong tekan digunakan untuk menyambung dua konduktor. Susunan rangkaian sambungannya seperti gambar 3.2. Kemudian rangkaian sambungan tersebut diletakan dalam rahang cetak alat penyambung tekan. Penekanan dilakukan sebanyak 5 kali pada selongsong sambungan.



(a) Diagram sambungan



(b) Sambungan yang diuji

Gambar 3.2 : Sambungan Konduktor dengan Selongsong tekan

Keterangan gambar:

$L$  : Panjang selongsong tekan = 39 cm.

$L_c$  : Panjang bagian konduktor yang masuk ke selongsong = 18,5 cm.

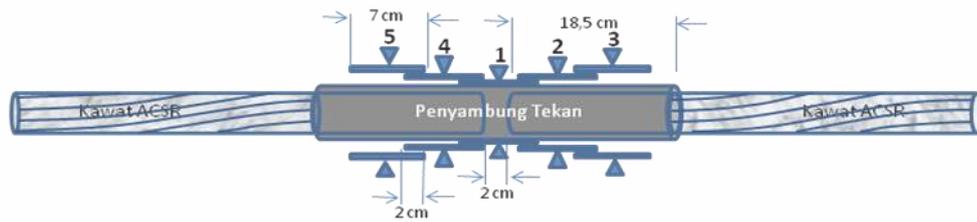
$a$  : Panjang bagian selongsong yang tidak ditekan = 6 cm.

$c$  : Panjang tumpang tindih penekanan = 2 cm.

$d$  : Lebar tapak tekan = 7 cm.

Jarak antar ujung konduktor dalam selongsong = 2 cm.

Panjang konduktor = 50 cm.



(a). Urutan Penekanan Pada Contoh Uji Berkode TU



(b). Urutan Penekanan Pada Contoh Uji Berkode UU



(c). Urutan Penekanan Pada Contoh Uji Berkode UT

Gambar 3.3 : Urutan Pelaksanaan Penekanan Sesuai Kode Uji

### 3.3 Pelaksanaan Pengujian

Tempat : Laboratorium Daya PT PLN (Persero) Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan.

Tahapan pelaksanaan pengujiannya adalah sebagai berikut:

- a. Membuat rangkaian pengujian yang menghubungkan sumber arus dengan contoh uji, dan menempelkan ujung sensor termokopel pada titik-titik tekan di selongsong sambungan.
- b. Menghidupkan sumber arus dan mengalirkan arus ke rangkaian pengujian sebesar 100% arus nominal atau 271 A konstan. Pengukuran temperatur sambungan secara otomatis oleh alat ukur yang digunakan dengan interval

waktu 1 menit, sampai didapatkan perubahan temperatur kurang dari  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  pada  $\Delta t = 1$  jam.



Gambar 3.4 : Rangkaian Pengujian

- c. Melakukan proses pendinginan contoh uji sehingga temperturnya sama dengan temperatur ruangan.
- d. Menaikkan arus pengujian menjadi 120% arus nominal atau 325 A konstan. Kemudian mengukur temperatur sambungan sama seperti pada langkah huruf (b) di atas.

### 3.4 Hasil Pengukuran

Dua besaran yang diukur dalam pengujian ini sebagai data hasil pengujian adalah arus uji dan temperatur sambungan. Arus uji diukur dengan menggunakan ampere meter tipe *clamp on*. Sedangkan pengukuran temperatur sambungan dilakukan pada 5 titik tekan di selongsong sambungan dengan menggunakan

sensor termokopel yang menempel kuat padanya. Pengukuran dilakukan secara otomatis dan terekam dalam memori komputer yang terhubung pada alat ukur. Data hasil pengukuran dapat dilihat dalam lampiran L3.

