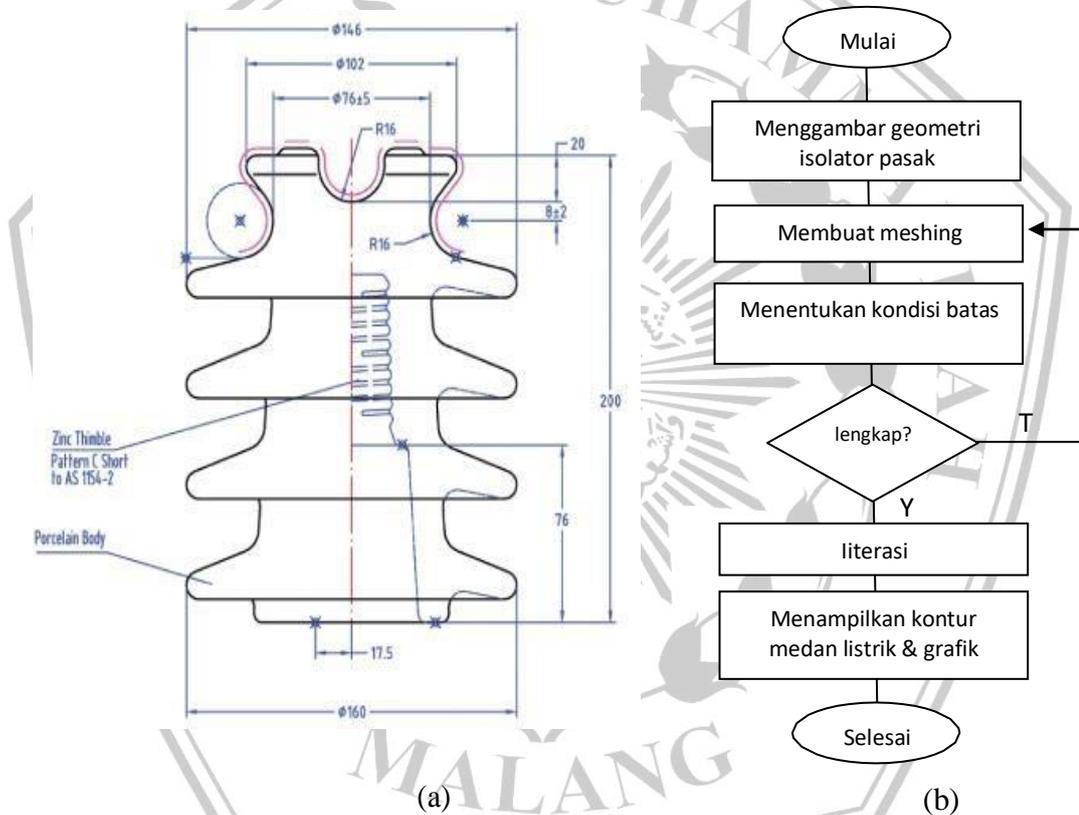


### BAB III METODE PENELITIAN

#### 3.1 Obyek Penelitian

Obyek penelitian yang digunakan untuk simulasi medan listrik menggunakan isolator jenis pasak (*pin-insulator*) dengan rating tegangan nominal 33kV sesuai standart ALP-33-920. Konstruksi isolator dan analisa distribusi medan listrik pada isolator pasak terbuat dari keramik dan kaca secara umum digambarkan blok diagram pada Gambar 3.1 berikut.

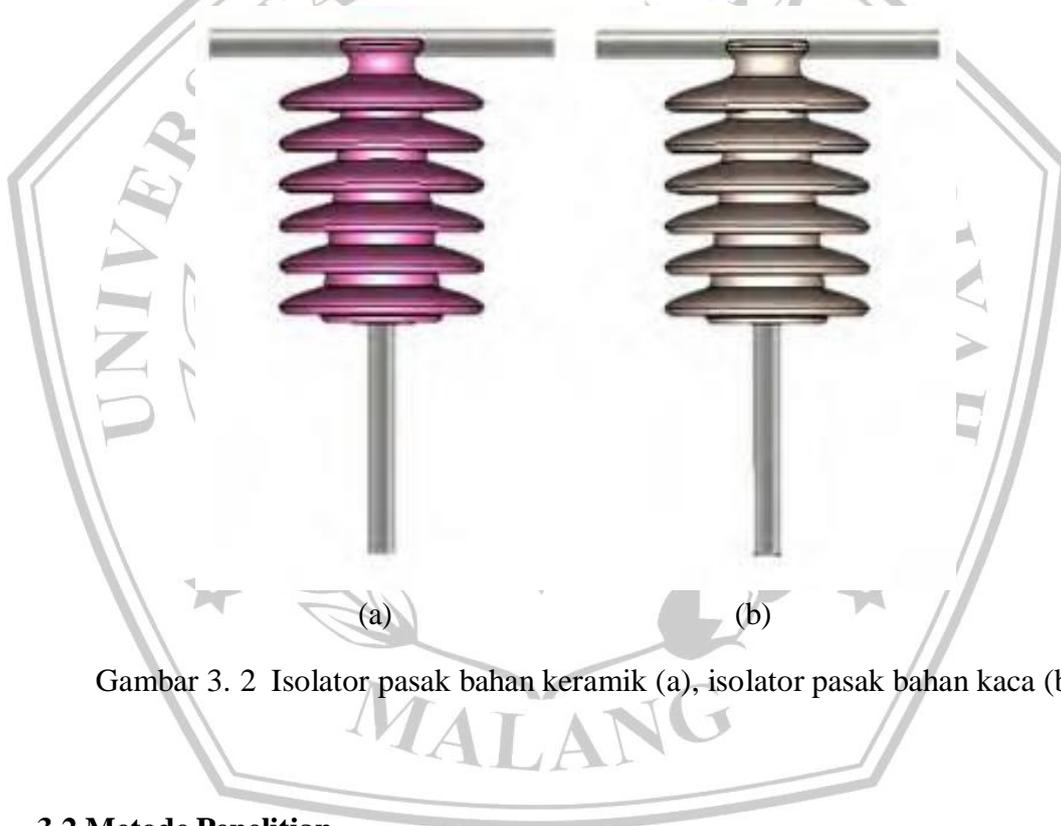


Gambar 3. 1 (a) Geometri isolator pasak yang digunakan dalam penelitian  
(b) Flowchart simulasi menggunakan CST Studio

Isolator jenis pasak (*pin type insulator*) yang berada pada tiang-tiang lurus (*tangent pole*) dan tiang sudut (*angle pole*) diperlihatkan di sudut  $5^\circ$  sampai  $30^\circ$ . Biasanya berbahan keramik dan kaca berbentuk kepingan di bawahnya diberi pasak terbuat dari besi tempa atau baja. Setiap bagian terikat oleh suatu bahan

semen yang memiliki kualitas tinggi. Bentuk kepingan melebar ke bawah seperti payung untuk mencegah hujan mengenai permukaan kepingan. Kekuatan elektris mempengaruhi banyaknya kepingan, pada umumnya jumlah potongan ini hingga lima buah.

Sebagai perbedaan medan listrik yang disimulasikan, dilakukan dua varian pemodelan pasca isolator dalam simulasi ini. Model pertama menggunakan isolator penyangga yang terbuat dari bahan keramik sesuai versi katalog, dan model ke-2 memakai kaca sebagai versi pembanding. Pemodelan ini dilakukan untuk membandingkan distribusi medan listrik dua jenis bahan isolator pada kondisi normal: permukaan isolator terkontaminasi dan rusak.



Gambar 3. 2 Isolator pasak bahan keramik (a), isolator pasak bahan kaca (b)

### 3.2 Metode Penelitian

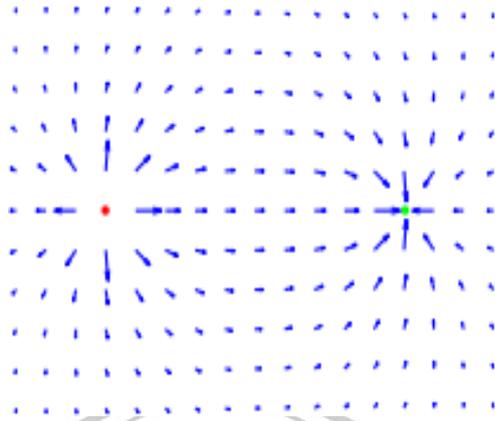
Dalam penelitian analisa distribusi medan listrik pada isolator pasak digunakan Metode Elemen Hingga atau FEM (Metode Elemen Hingga). Metode elemen hingga adalah metode numerik yang memecahkan masalah teknis dan matematika dari fenomena fisika. Jenis kasus yang bisa dituntaskan menggunakan metode elemen hingga dibagi

menjadi dua kelompok, seperti kumpulan analisis struktur dan kumpulan analisis non-struktur. Proses dekritisasi adalah tujuan utama dari metode elemen agar Dekritisasi mempermudah proses pengolahannya dengan membagi benda utuh menjadi lebih kecil. Analisis struktur berfungsi menganalisa sebuah tegangan pada struktur rangka, bucking dan getaran. Sedangkan analisis non-struktur merupakan bagian dari analisis peristiwa perpindahan panas, aliran fluida, potensial medan magnet, dan distribusi medan listrik.

Analisis pada skripsi ini menggunakan non-struktur distribusi potensial listrik dan medan listrik. Pokok utama dari FEM memperbesar jumlah suatu elemen hingga dengan membagi bagian struktur, badan atau daerah yang dianalisa. Berdasarkan analisis yang digunakan dasar dari FEM merupakan proses diskretisasi. Elemen merupakan sekelompok titik (*nodal*) yang saling bergabung, dapat berbentuk satu, dua atau tiga dimensi. Di sisi lain, kumpulan node dan elemen didefinisikan sebagai jaringan. Cara perhitungannya adalah dengan menghitung jaring kecil dan kemudian menggabungkannya menjadi bentuk yang lebih besar. Hasil yang diperoleh adalah perkiraan berkelanjutan dari hubungan antara sumber daya untuk memberikan bentuk yang diharapkan.

### **3.3 Penghitungan Medan Listrik**

Medan listrik ialah wilayah yang terpengaruh oleh sifat listrik suatu muatan. Konversi Hasil medan listrik di dalam isolator dapat terpengaruh nilai arus bocor dan nilai tegangan tahan. Medan listrik dihasilkan oleh adanya muatan listrik seperti elektron, proton, dan ion pada ruang di area pengukuran. Medan listrik ini erat kaitannya dengan coulomb, dan satuan medan listrik ini ialah N/C atau newton/coulomb.



Gambar 3. 3 Medan listrik yang timbul dari titik satu ke titik lainnya

Rumus 3.1 Medan listrik dapat muncul karena adanya gaya (F) yang bertumpu pada suatu muatan listrik.

$$F_t = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_t}{R^2} \mathbf{a}_{1t}$$

ketika gaya terkonsentrasi pada suatu muatan:

$$\frac{F_t}{q_t} = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_{1t}^2} \mathbf{a}_{1t}$$

Sehingga didapatkan rumus medan listrik,

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \mathbf{a}_{1t}$$

Mengingat nilai potensial (V), Anda juga dapat menggunakan persamaan gradien potensial untuk menghitung medan listrik :

$$\nabla V = \frac{\partial V}{\partial x} \mathbf{a}_x + \frac{\partial V}{\partial y} \mathbf{a}_y + \frac{\partial V}{\partial z} \mathbf{a}_z$$

Sehingga didapatkan nilai E :

$$\mathbf{E} = -\nabla V$$

### 3.4 Energi pada Medan Listrik

Distribusi medan listrik menyimpan muatan energi ( $W_E$ ), dan energi tersebut dapat ditentukan dengan rumus berikut:

$$W_E = \frac{1}{2} \int_{Vol} \rho_v V dv$$

Persamaan di atas merupakan perhitungan muatan titik atau energi potensial total pada suatu bidang.

Keterangan:

$\rho_v$  = Kerapatan volume dengan medan potensial ( $C/m^3$ )

$V$  = Potensial Listrik pada titik

Total energy ( $W_E$ ) pada medan listrik pada suatu volume adalah :

$$W_E = \frac{1}{2} \int_V \epsilon (E)^2 dv$$

Sehingga didapatkan total energy ( $W_E$ ):

$$W_E = \frac{1}{2} \int_V \epsilon (\nabla V)^2 dv$$

### 3.5 Penerapan Perhitungan Medan Listrik dengan Metode Elemen Hingga

Nilai potensial listrik ( $V$ ) mempunyai kaitan erat dengan kerapatan flux listrik ( $D$ ) dan kuatnya medan listrik ( $E$ ). Maka didapatkan kaitan antara potensial listrik ( $V$ ), flux listrik ( $D$ ), medan listrik ( $E$ ) dan gradien  $\nabla$ .

$$\nabla \cdot D = \rho_v$$

Hubungan  $D$  dan  $E$

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E$$

dimana,

$$\epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon$$

Bila polarisasi dianggap nol, akan didapat persamaan berupa,

$$\nabla \cdot \nabla V = -\frac{\rho_v}{\epsilon}$$

Keterangan :

E = Intensitas Medan Listrik (V/m)

V = Potensial Listrik (V)

D = Kerapatan Fluks Listrik (C/m<sup>2</sup>)

Gradien potensial pada persamaan *Poisson* dapat diuraikan menjadi persamaan *Laplace* berikut :

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} a_x + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} a_y + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} a_z = - \frac{\rho_v}{\epsilon}$$

Bila  $\rho_v = 0$  , jika kondisi muatan titik dan kerapatan muatan permukaan dipakai sebagai kondisi batas dan sumber medan, maka didapatkan nilai :

$$\nabla \cdot \nabla V = 0$$

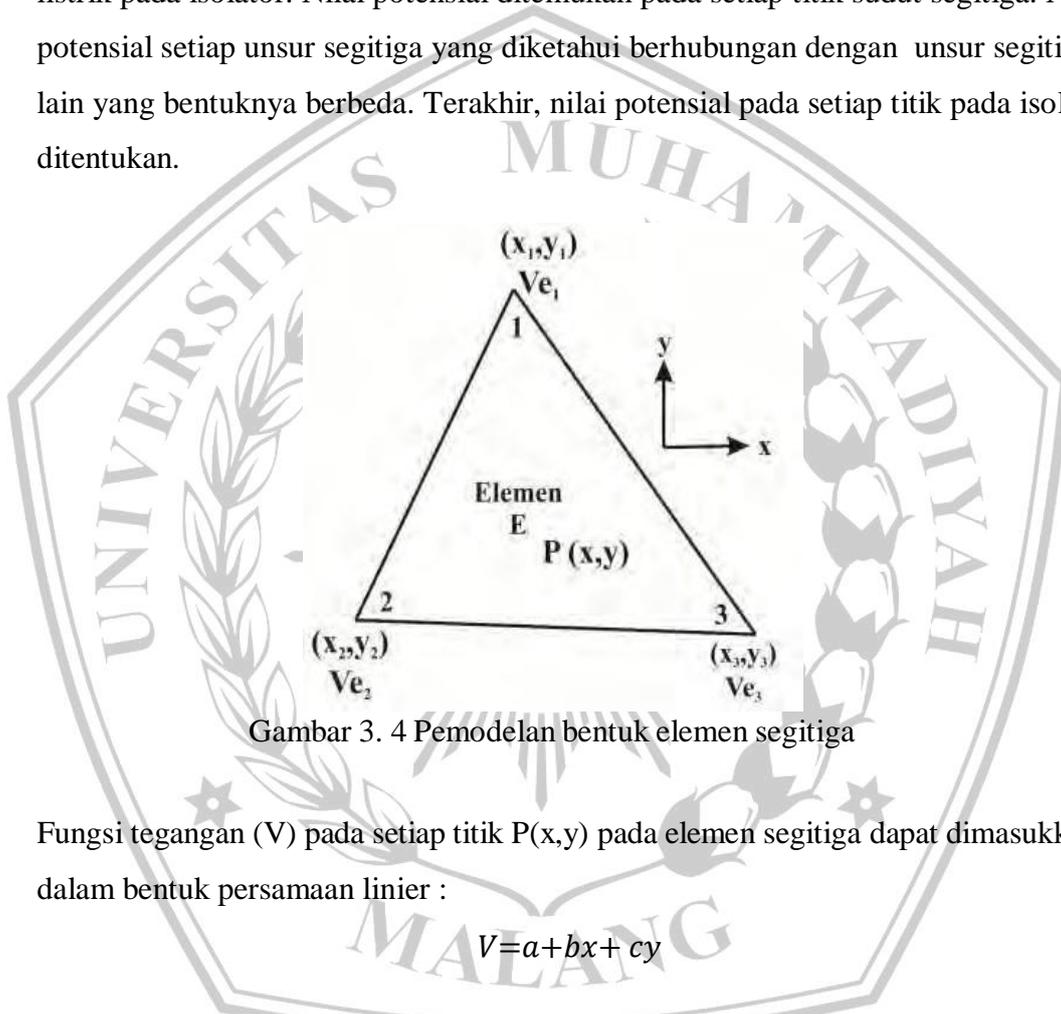
Persamaan *Laplace* jika dirumuskan dalam koordinat kartesius, dapat menjadi bentuk persamaan :

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} a_x + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} a_y + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} a_z = 0$$

Dimana nilai  $\rho_v = 0$

### 3.6 Perhitungan Medan Listrik Pada Elemen Segitiga

Penyelesaian perhitungan sebaran medan listrik memakai metode elemen hingga dengan mendiskritisasi atau memodelkan jaringan isolator kecil. Jaringan kecil ini merupakan jaringan elemen segitiga yang jauh lebih besar. Jika kita dapat mengetahui nilai potensial ( $V$ ) setiap elemen segitiga dan menghitung nilai medan listrik setiap elemen segitiga, maka kita dapat mengetahui nilai distribusi medan listrik pada isolator. Nilai potensial ditemukan pada setiap titik sudut segitiga. Nilai potensial setiap unsur segitiga yang diketahui berhubungan dengan unsur segitiga lain yang bentuknya berbeda. Terakhir, nilai potensial pada setiap titik pada isolator ditentukan.



Gambar 3. 4 Pemodelan bentuk elemen segitiga

Fungsi tegangan ( $V$ ) pada setiap titik  $P(x, y)$  pada elemen segitiga dapat dimasukkan dalam bentuk persamaan linier :

$$V = a + bx + cy$$

Dari gambar 3.4 dapat hasil nilai potensial listrik ( $V$ ) mengacu permutasi  $i, i_1$ , dan  $i_2$ . Oleh karena itu, diperoleh persamaan berdasarkan nilai kemiringannya :

$$V = \sum_{i=1}^3 V_i \alpha_i(x, y)$$

Energi ( $WE$ ) pada setiap titik sudut segitiga yang mempunyai gradien potensial dapat dirumuskan sebagai:

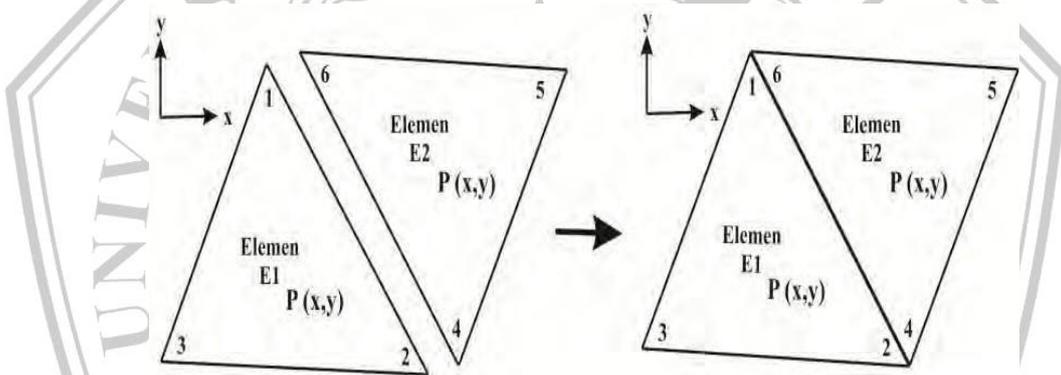
$$W_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \int |\nabla V|^2 ds$$

Sehingga nilai energinya menjadi :

$$W_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 V_i \int \nabla \alpha_i \nabla \alpha_j ds V_j$$

### 3.7 Penyatuan Elemen Segitiga

Setelah didiskritisasi menjadi bentuk elemen segitiga, potensial setiap bagian isolator dapat dihitung dengan kombinasi setiap elemen segitiga ke dalam dimensi lengkapnya. Nilai medan listrik (E), rapat fluks magnet (D), dan energi (W) di dalam isolator ditentukan dari nilai potensial setiap kombinasi elemen segitiga.



Gambar 3. 5 Gabungan dua elemen segitiga

Persamaan di atas ialah matriks koefisien segitiga terhubung. Matriks koefisien kombinasi dua elemen segitiga sebagai berikut :

$$S = \begin{bmatrix} S_{11}^1 + S_{66}^2 & S_{12}^1 + S_{64}^2 & S_{13}^1 & S_{65}^2 \\ S_{21}^1 + S_{46}^2 & S_{22}^1 + S_{44}^2 & S_{23}^1 & S_{45}^2 \\ S_{31}^1 & S_{32}^1 & S_{33}^1 & 0 \\ S_{56}^1 & S_{54}^1 & 0 & S_{55}^2 \end{bmatrix}$$

$S_{i,j}$  adalah komponen matriks cpada sebuah elemen segitiga :

$$S_{ij} = \int \nabla \alpha_i \nabla \alpha_j ds$$

Oleh karena itu, persamaan tersebut dapat diturunkan sebagai matriks persegi dalam

bentuk energi medan listrik :

$$W_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r V^t S V$$

Keterangan :

$W_E$  = Energi pada medan

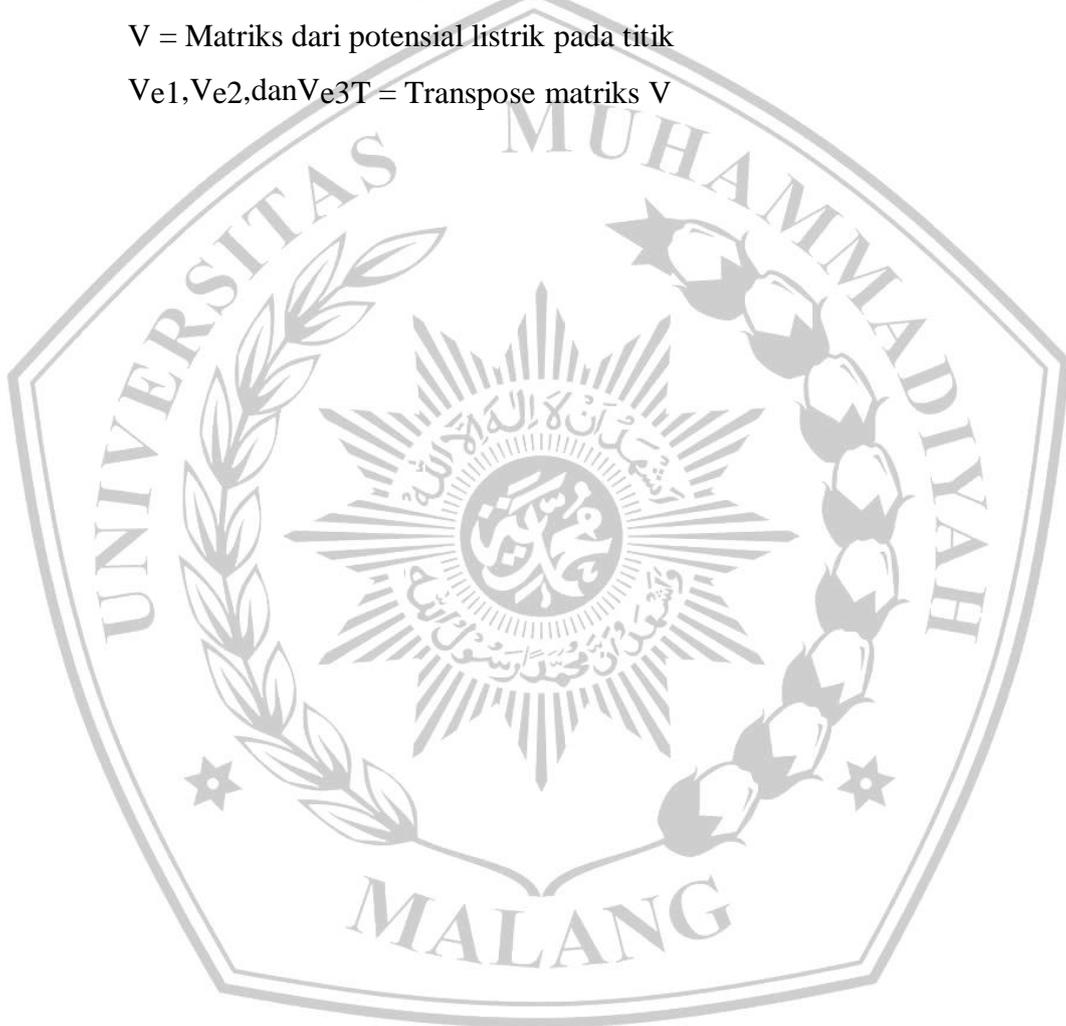
elektrostatik  $\epsilon_r$  = Permittivitas

relatif (*bahan*)

$\epsilon_0$  = Permittivitas ruang hampa ( $8,854 \times 10^{-12}$ )

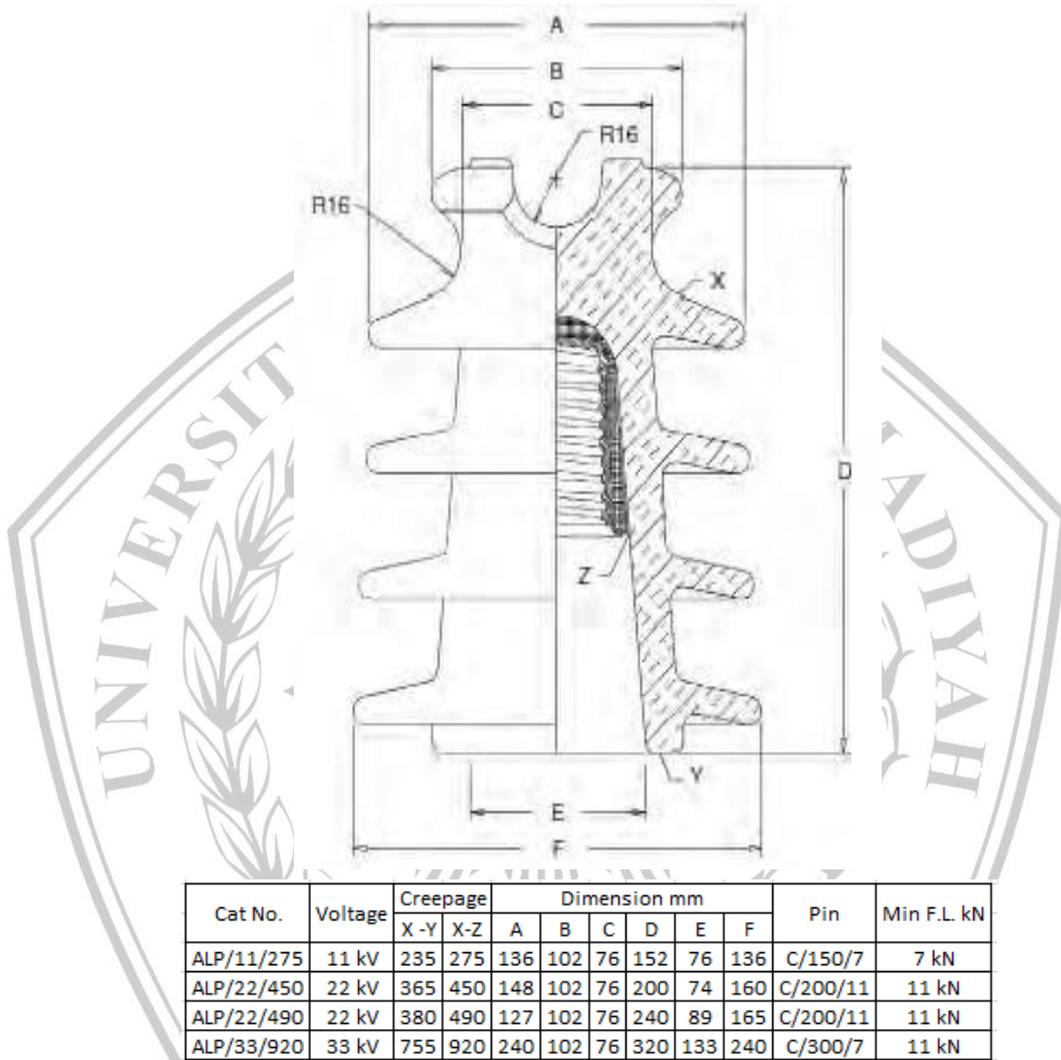
$V$  = Matriks dari potensial listrik pada titik

$V_{e1}, V_{e2}, \text{ dan } V_{e3}^T$  = Transpose matriks  $V$



### 3.8 Konstruksi dan Spesifikasi Isolator Pasak Bahan Keramik dan Kaca

Isolator yang disimulasikan adalah isolator pasak dari bahan keramik dan kaca. Konstruksi isolator dapat dilihat pada gambar 3.6



Gambar 3. 6 Kontruksi isolator pasak ALP-33-920 dengan rating 33kV

Isolator yang disimulasikan ialah tipe ALP-33-920, menggunakan 6 sirip isolator dengan tujuan untuk media penyebaran medan listrik. spesifikasi isolator dapat dilihat pada tabel 3.1.

Specification	Unit	
	VoltageClass	kV
SectionLength"L"	Mm	240
SectionHeight"H"	Mm	320
CreepageDistance	X-Y	755
	Y-Z	920
Pin	C/300/7	
MinimumBendingFallingLoad	kN	11

Tabel 3. 1 Spesifikasi isolator type ALP-33-920

### 3.9 Material Penyusun Isolator

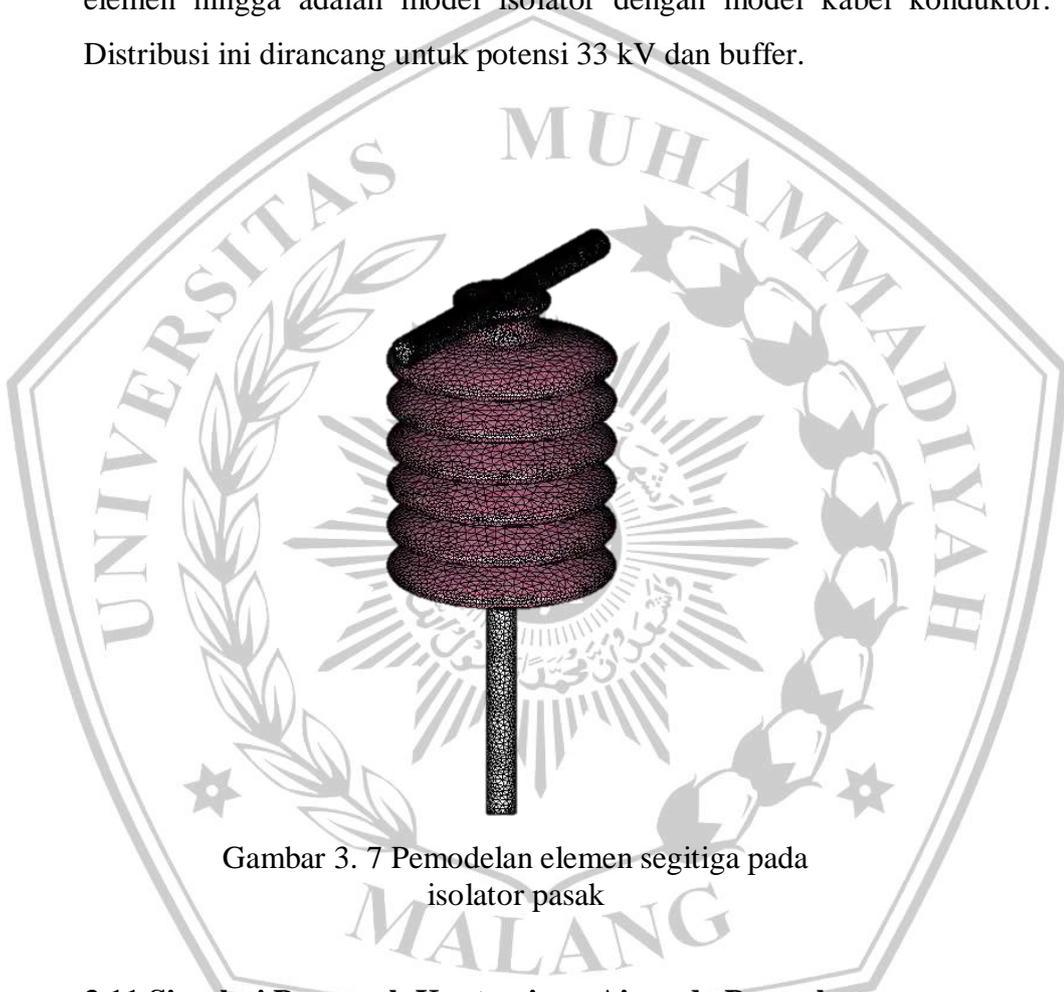
Komponen dari isolator pasak yang dipakai pada kali ini diambil dari library CST Studio Suit.

No	Unit	Material	
		Porselen	Glass
1	Epsilon	6	4.8
2	Mue	1	1
3	El.Cond.	$1 \times 10^{-15}$	
4	Rho	2400	2230
5	Therm.Cond.	2	1.1
6	Heatcap.	1.1	0.75
7	Diffusivity	$7.57576 \times 10^{-7}$	$6.57698 \times 10^{-7}$
8	Young'sMod.	104	64
9	Poiss.Ratio	0.3	0.2
10	ThermalExp.	4.9	3.3

Tabel 3. 2 Data sheet material isolator

### 3.10 Pemodelan Isolator Pasak kedalam Bentuk Elemen Segitiga

Simulasi berbasis FEM (finite element method) ini memakai pemodelan elemen segitiga (tetrahedral mesh) untuk menentukan parameter medan listrik. Isolator yang dimodelkan adalah isolator distribusi aerodinamis tipe pin garis. Pemodelan geometri dengan metode elemen hingga adalah model isolator dengan model kabel konduktor. Distribusi ini dirancang untuk potensi 33 kV dan buffer.



Gambar 3. 7 Pemodelan elemen segitiga pada isolator pasak

### 3.11 Simulasi Pengaruh Kontaminan Air pada Permukaan

Insulator tiang yang dipasang di luar ruangan secara alami rentan terhadap gangguan eksternal seperti hujan. Tetesan air di permukaan menyebabkan gangguan medan listrik diukur dalam pemodelan simulasi. Bentuk tetesan air menempel pada permukaan isolator ini berbeda-beda tergantung sudut kontak. Untuk mengetahui pengaruh sudut kontak tetesan air, dilakukan simulasi pengaruh sudut kontak tetesan air terhadap distribusi medan listrik pada rusuk pertama isolator penyangga.

Kondisi yang digunakan dalam simulasi ini ada3:

1. Kondisi air 1

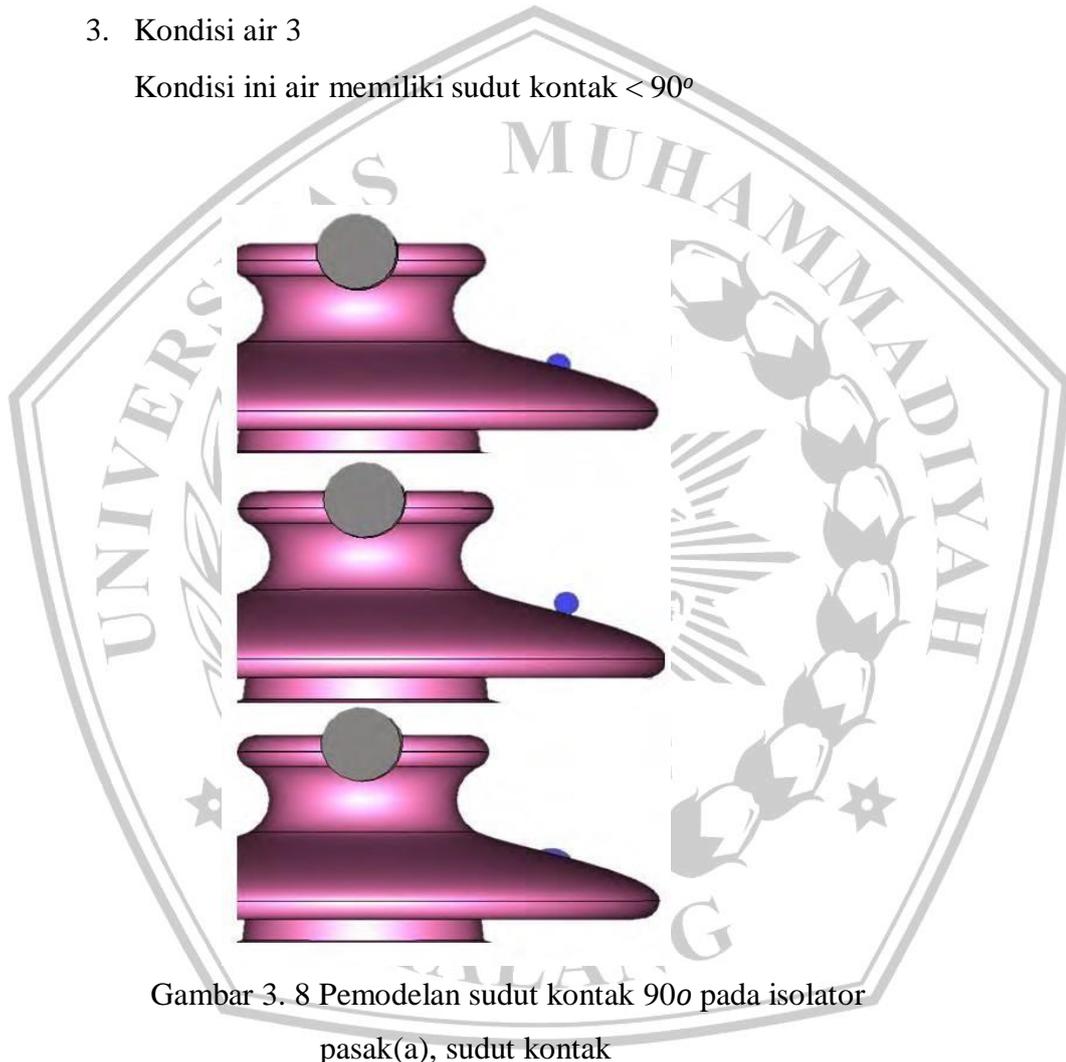
Kondisi ini air memiliki sudut kontak tepat  $90^\circ$

2. Kondisi air 2

Kondisi ini air memiliki sudut kontak  $> 90^\circ$

3. Kondisi air 3

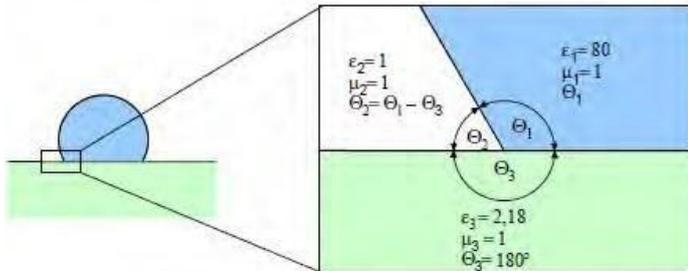
Kondisi ini air memiliki sudut kontak  $< 90^\circ$



Gambar 3. 8 Pemodelan sudut kontak  $90^\circ$  pada isolator pasak(a), sudut kontak

Terbentuknya sudut kontak yang besar pada tetesan air mempengaruhi kuat medan listrik pada tepi tetesan air. Hal ini disebabkan oleh dua faktor:

1. Sudut kontak pembentukan butir air
2. Nilai *epsilon* antara air, udara disekitar dan bahan isolator



Gambar 3. 9 Pengaruh sudut kontak dan nilai epsilon

dimana  $\epsilon$  adalah nilai konstanta dielektrik material dan  $\theta$  adalah sudut yang dihasilkan oleh kontak tiga material antara air, udara, dan permukaan material yang terkena tetesan hujan.

Besarnya medan listrik ke permukaan suatu isolator dicari sebagai berikut:

$$E_p = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \rho^{t+n-1}$$

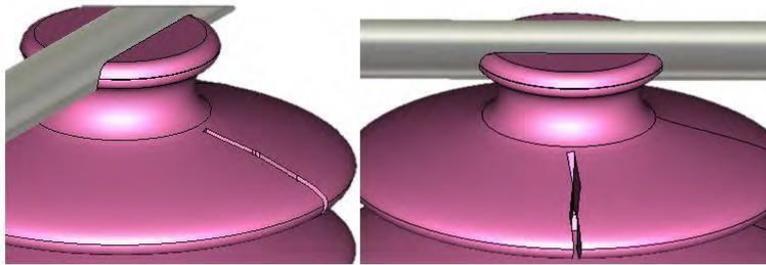
dan

$$E_\varphi = \sum_{n=0}^{\infty} b_n \varphi^{t+n-1}$$

Nilai  $E_p$  dan  $E_\varphi$  tergantung dari jarak  $\rho$  dan  $\varphi$ , posisi dari persentuhan tiga titik, singularitas eksponen  $t$  dan factor  $a_n$  dan  $b_n$

### 3.12 Simulasi Pengaruh Retak Permukaan Isolator

Kemampuan suatu dielektrik isolator dalam menahan medan listrik dipengaruhi oleh kerusakan mekanis pada permukaan isolator. Salah satu jenis kerusakan mekanis dapat terjadi di isolasi keramik dan kaca ialah retak. Retak dan rongga isolator pasti akan mempengaruhi nilai medan listrik isolator tersebut. Pengaruh retakan isolator terhadap nilai medan listrik dianalisis dengan memodelkan isolator retak yang diberi lubang pada rusuk pertama isolator.



Gambar 3. 10 Pemodelan keretakan pada permukaan isolator pasak