

MODEL ELEMEN RANGKAIAN LISTRIK DAN PENYELESAIANNYA UNTUK PROGRAM SIMULASI

Hari Sutiksno¹⁾, Francisca H. Chandra²⁾, Anastasia Savitri³⁾, Setya Ardhi⁴⁾

Teknik Elektro STTS Surabaya

Jl. Ngagel Jaya Tengah 73-77 Surabaya 60284

email : harisutiksno@gmail.com¹⁾, fhc@quadraluminari.ac.id²⁾, savitri@stts.edu³⁾, setyaardhi@yahoo.com⁴⁾

Abstrak

Perangkat simulasi rangkaian listrik sangat mendukung dalam proses belajar mengajar. Untuk mensimulasikan rangkaian listrik yang terdiri dari elemen elemen sumber tegangan, sumber arus, resistor, induktor, kapasitor, dan saklar, diperlukan metode penyelesaian rangkaian yang didasarkan pada model matematika yang menyatakan hubungan antara arus dan tegangan setiap elemen dalam bentuk matriks. Pemecahan persamaan dilakukan dengan metode algoritma Gauss-Jordan. Sedangkan untuk kondisi peralihan, model diskrit dinyatakan dalam persamaan state dengan pendekatan metode backward-difference.

Kata kunci :

Simulasi, rangkaian listrik, backward-difference, persamaan rekursif

1. Pendahuluan

Dalam kegiatan proses belajar mengajar mata pelajaran rangkaian listrik untuk sekolah menengah kejuruan, program simulasi sangat membantu dalam mempermudah dan meningkatkan pemahaman. Ada banyak program simulasi yang telah dikembangkan, seperti Circuit Maker, Workbench, dan Orcad [1],[2],[3],[4]. Namun program tersebut lebih cocok digunakan untuk aplikasi rangkaian listrik dengan elemen elemen yang sangat kompleks. Di samping itu program program simulasi yang ada menggunakan bahasa asing, sehingga tidak cocok bagi pemula saat ini.

Untuk mensimulasikan rangkaian listrik dengan elemen resistor, induktor, dan kapasitor, serta sumber tegangan, serta saklar, perlu dibuat model matematis yang menyatakan hubungan arus dan tegangan semua elemen yang membentuk rangkaian listrik, berdasarkan teori dasar hukum Ohm, hukum Kirchhoff untuk arus dan tegangan. Model pemecahan masalah peralihan (*transient condition*) dapat digunakan metode *backward-difference* untuk membentuk persamaan state dalam bentuk diskrit. Dalam makalah ini, ditunjukkan hasil simulasi rangkaian listrik pada kondisi tunak dan kondisi peralihan.

2. Tinjauan Pustaka

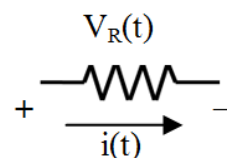
2.1. Hukum Ohm

Hukum Ohm menyatakan bahwa arus yang mengalir pada resistor adalah berbanding lurus dengan

beda potensial dan berbanding terbalik dengan resistansinya, atau secara matematis dinyatakan sebagai [5]

$$I = \frac{V}{R} \quad (1)$$

Dalam persamaan (1) I adalah arus yang mengalir (Amp), V adalah beda potensial pada resistor (volt), dan R adalah resistansi (Ohm). Di dalam resistor, arus mengalir dari kutub positif ke kutub negatif (gambar 1).



Gambar 1 Resistor

2.2. Hukum Kirchhoff untuk Arus (KCL)

Hukum Kirchhoff untuk arus, menyatakan bahwa pada suatu titik cabang jumlah arus yang masuk sama dengan jumlah arus yang keluar dari titik tersebut. Secara matematis dinyatakan sebagai:

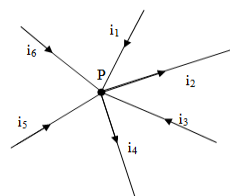
$$\sum I_{masuk} = \sum I_{keluar} \quad (2)$$

atau

$$\sum I = 0 \quad (3)$$

Dalam gambar 2, berlaku hubungan :

$$i_1 + (-i_2) + i_3 + (-i_4) + i_5 + i_6 = 0 \quad (4)$$

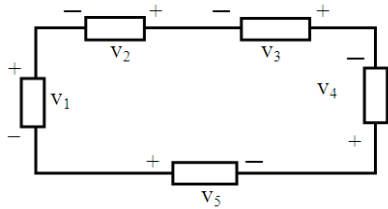


Gambar 2 Hukum Kirchhoff untuk Arus

2.3. Hukum Kirchhoff untuk Tegangan (KVL)

Hukum Kirchhoff untuk tegangan menyatakan bahwa jumlah berarah tegangan dalam sebuah rangkaian listrik tertutup adalah sama dengan nol, atau secara matematis untuk rangkaian gambar 3 dinyatakan sebagai:

$$\sum V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 = 0 \quad (4)$$



Gambar 3 Tegangan dalam rangkaian tertutup

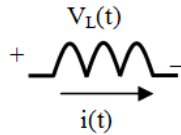
2.4. Induktor

Induktor adalah elemen listrik yang pada umumnya berupa kumparan (gambar 4). Hubungan antara arus dan tegangan dalam induktor dinyatakan sebagai:[6]

$$v_L(t) = L \frac{di}{dt} \tag{5}$$

Dalam persamaan (5), $v_L(t)$ adalah tegangan terinduksi dalam induktor (V), $i(t)$ adalah arus yang mengalir dalam induktor (A), dan L adalah induktansi (H)

Jika arus induktor tidak berubah (konstan), maka dalam induktor tidak akan terinduksi tegangan.



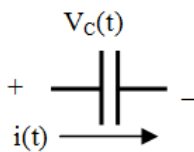
Gambar 4 Induktor

2.5. Kapasitor

Kapasitor adalah elemen listrik yang pada dasarnya berupa dua permukaan konduktor yang dipisahkan dengan media isolator, (gambar 5). Hubungan antara arus dan tegangan dalam kapasitor [7]

$$i_C(t) = C \frac{dv_c(t)}{dt} \tag{6}$$

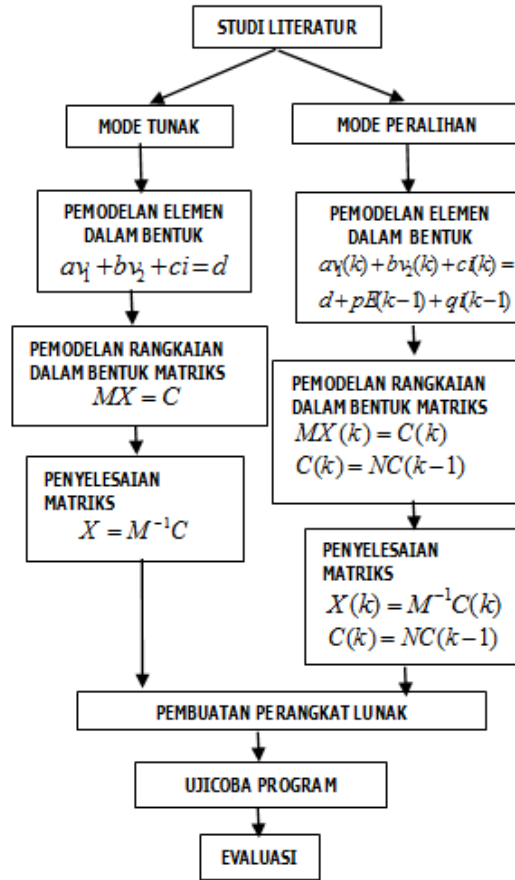
Jika tegangan pada kapasitor adalah konstan (DC), maka arus tidak akan mengalir.



Gambar 5 Kapasitor

3. Metode Penelitian

Langkah-langkah yang ditempuh dalam penelitian ini digambarkan dengan diagram alir seperti pada gambar 6.



Gambar 6 Diagram Alir Langkah Penelitian

Langkah-langkah tersebut adalah sebagai:

1. Studi Literatur mengenai analisa rangkaian untuk mode tunak dan peralihan
2. Mencari hubungan antara arus dan tegangan setiap elemen rangkaian listrik dengan sumber DC untuk mode tunak dan peralihan, serta penyelesaian rangkaian listrik yang terdiri dari berbagai elemen.
3. Memodelkan elemen untuk mode tunak dalam bentuk $av_1 + bv_2 + ci = d$.
4. Memodelkan elemen untuk mode peralihan dalam bentuk $av_1(k) + bv_2(k) + ci(k) = d + pE(k-1) + qi(k-1)$
5. Memodelkan rangkaian listrik dengan beberapa elemen ke dalam bentuk matriks $MX = C$ untuk mode tunak, dan $MX(k) = C(k)$ dan $C(k) = NC(k-1)$
6. Mencari inverse dari matriks M dengan menggunakan metode Gauss-Jordan
7. Menghitung vektor X sebagai penyelesaian rangkaian
8. Pembuatan program simulasi
9. Melakukan evaluasi program simulasi

4. Pembahasan dan Hasil

4.1. Pembahasan

4.1.1. Model Elemen Rangkaian untuk Mode Tunak

Rangkaian listrik terdiri dari beberapa elemen, yaitu sumber-sumber listrik dan elemen-elemen seperti resistor, induktor, kapasitor, dan saklar. Untuk mode DC, model matematika dari setiap elemen dinyatakan seperti tabel 1. Secara umum model setiap elemen dinyatakan sebagai:

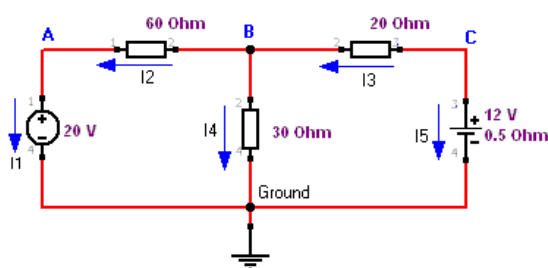
$$av_1 + bv_2 + ci = d \quad (7)$$

dimana a,b,c, dan d merupakan parameter elemen. Model pemecahan dapat diilustrasikan dalam menghitung arus dan tegangan rangkaian seperti pada gambar 7. Langkah dalam proses penyelesaian adalah mengidentifikasi skema rangkaian listrik menjadi jenis elemen dan besarnya, serta sambungan antar elemen dalam rangkaian.

Tabel 1 Model Matematika Elemen-Elemen dalam Mode Tunak

| NO. | ELEMEN | SIMBOL | HUBUNGAN ANTARA V DAN I | Parameter Elemen | | | | |
|-----|-----------------|--------|--------------------------|------------------|----|----|-------|---|
| | | | | a | b | c | d | |
| 1 | Resistor | | $v_1 - v_2 - iR = 0$ | 1 | -1 | -R | 0 | |
| 2 | Induktor | | $v_1 - v_2 = 0$ | 1 | -1 | 0 | 0 | |
| 3 | Kapasitor | | $i = 0$ | 0 | 0 | 1 | 0 | |
| 4 | Sumber Arus | | $i = I_0$ | 0 | 0 | 1 | I_0 | |
| 5 | Sumber Tegangan | | $v_1 - v_2 = E_0$ | 1 | -1 | 0 | E_0 | |
| 6 | Baterai | | $v_1 - v_2 - iR_i = E_0$ | 1 | -1 | -R | E_0 | |
| 7 | Ground | | $v = 0$ | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| 8 | Saklar | | ON | $v_1 - v_2 = 0$ | 1 | -1 | 0 | 0 |
| | | | OFF | $i = 0$ | 0 | 0 | 1 | 0 |

Terdapat 4 node (termasuk ground) dalam rangkaian gambar 6. Node A,B, C, dan Ground diberi berturut-turut label Node 1, 2, 3, dan 4 (gambar 7).



Gambar 7 Arah arus

Selanjutnya data sambungan (node) tersebut dinyatakan dalam sebuah matrix berdasarkan hukum Kirchhoff untuk arus (tabel 2).

Tabel 2 Sambungan antar elemen

| No. | Komponen | Node | | Arus |
|-----|------------------|------|---|-------|
| 1 | Sumber Tegangan | 1 | 4 | i_1 |
| 2 | Resistor 60 ohm | 2 | 1 | i_2 |
| 3 | Resistor 20 ohm | 3 | 2 | i_3 |
| 4 | Resistor 30 ohm | 2 | 4 | i_4 |
| 5 | Baterai 12V/0.5Ω | 3 | 4 | i_5 |

Di node A, B dan C berlaku hubungan sebagai:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Data jenis elemen dan besarnya dinyatakan dalam sebuah model matrix berdasarkan hukum Ohm dan hukum Kirchhoff untuk tegangan (tabel 3).

Tabel 3 Model Matematika tiap elemen

| No. | Elemen | Model Matematika |
|-----|---------------------|---------------------------|
| 1 | Sumber Tegangan 20V | $v_1 - v_4 = 20$ |
| 2 | Resistor 60 ohm | $v_2 - v_1 - 60i_2 = 0$ |
| 3 | Resistor 20 ohm | $v_3 - v_2 - 20i_3 = 0$ |
| 4 | Resistor 30 ohm | $v_2 - v_4 - 30i_4 = 0$ |
| 5 | Baterai 12V/0.5 ohm | $v_3 - v_4 - 0.5i_5 = 12$ |
| 6 | Ground | $v_4 = 0$ |

Dengan demikian model matematika rangkaian dapat dinyatakan dalam bentuk matriks sebagai:

$$MX = C \quad (9)$$

dengan

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -60 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -20 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -30 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.5 \end{bmatrix}$$

$$X = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4 \ i_1 \ i_2 \ i_3 \ i_4 \ i_5]^T$$

$$C = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 20 \ 0 \ 0 \ 0 \ 12]^T$$

Besaran yang akan dihitung adalah tegangan tiap node dan arus yang mengalir di setiap elemen, dalam bentuk vektor X, yang dapat diselesaikan sebagai:

$$X = M^{-1}C \quad (10)$$

Persamaan tersebut dapat diselesaikan dengan menggunakan algoritma Gauss-Jordan.[8] Melalui pemrograman diperoleh

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10.1235 & 0.2469 & 1 & 0.1687 & 0.1687 & -0.4938 & 0.3374 & 0.4938 \\ 0 & 0.2469 & 0.4938 & 1 & 0.0041 & 0.0041 & 0.0123 & 0.0082 & 0.9877 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.1687 & 0.0041 & 0 & -0.0139 & -0.0139 & -0.0082 & 0.0056 & 0.0082 \\ 0 & 0.1687 & 0.0041 & 0 & -0.0139 & -0.0139 & -0.0082 & 0.0056 & 0.0082 \\ 0 & -0.4938 & 0.00123 & 0 & -0.0082 & -0.0082 & -0.0247 & 0.0165 & 0.0247 \\ 0 & 0.3374 & 0.0082 & 0 & 0.0056 & 0.0056 & -0.0165 & 0.0221 & 0.0165 \\ 0 & 0.4938 & 0.9877 & 0 & 0.0082 & 0.0082 & 0.0247 & 0.0165 & -0.0247 \end{bmatrix}$$

sehingga:

$$X = [v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad v_4 \quad i_1 \quad i_2 \quad i_3 \quad i_4 \quad i_5]^T$$

$$X = [20 \quad 9.3 \quad 11.93 \quad 0 \quad -0.18 \quad -0.18 \quad 0.13 \quad 0.31 \quad -0.13]^T$$

Diperoleh bahwa tegangan di Node A,B, C, dan Ground adalah berturut-turut $v_1 = 20V$, $v_2 = 9.3V$, $v_3 = 11.93V$, $v_4 = 0V$. Sedang untuk arus tiap elemen berturut-turut sebagai $i_1 = -0.18A$, $i_2 = -0.18A$, $i_3 = 0.13A$, $i_4 = 0.31A$, dan $i_5 = -0.13A$

4.1.2. Model Elemen untuk Mode Peralihan

Pada mode peralihan, hubungan arus dan tegangan merupakan fungsi waktu. Implementasi dari hubungan tersebut dalam pemrograman dinyatakan dalam sistem waktu diskrit sebagaimana terlihat pada tabel 4. Untuk induktor, arus $i(k-1)$ merupakan nilai arus awal, untuk $k=1$. Nilai tersebut akan berubah untuk setiap proses rekursif, dimana $i(k-1)$ akan sama disubstitusikan dengan nilai $i(k)$ untuk proses selanjutnya. Demikian pula untuk kapasitor, $E(k-1)$ merupakan tegangan kapasitor mula-mula untuk $k=1$.

Tabel 4 Model diskrit pada mode Peralihan

| No. | Elemen | Parameter Elemen | | | | | |
|-----|-------------|------------------|----|----------------|---|---|----------------|
| | | a | b | c | d | p | q |
| 1 | Resistor | 1 | -1 | -R | 0 | 0 | 0 |
| 2 | Induktor | 1 | -1 | $-\frac{L}{T}$ | 0 | 0 | $-\frac{L}{T}$ |
| 3 | Kapasitor | 1 | -1 | $-\frac{T}{C}$ | 1 | 1 | 0 |
| 4 | Sumber Arus | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | Sumber Teg. | 1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | Baterai | 1 | -1 | $-R_i$ | 0 | 0 | 0 |
| 7 | Ground | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | Saklar | ON | 1 | -1 | 0 | 0 | 0 |
| | | OFF | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

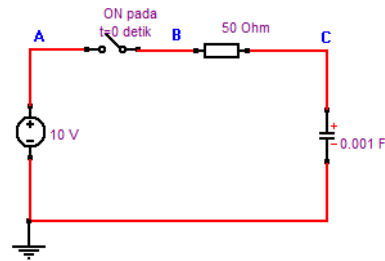
Model diskrit dari setiap elemen dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan:

$$av_1(k) + bv_2(k) + ci(k) = d + pE(k-1) + qi(k-1) \quad (11)$$

Tabel 5 menunjukkan parameter dari elemen-elemen rangkaian listrik dengan model matematika dalam bentuk persamaan (12) Pada mode peralihan, untuk mendapatkan model diskrit diilustrasikan melalui pemecahan persoalan RC seperti pada gambar 8.

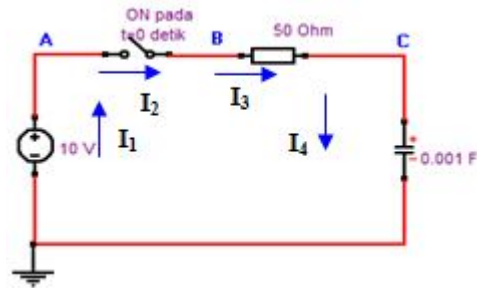
Tabel 5 Model diskrit tiap elemen pada mode peralihan

| NO. | KOMPONEN | SIMBOL | HUBUNGAN ANTARA $v(k)$ DAN $i(k)$ | |
|-----|-----------------|--------|--|-----------------|
| 1 | Resistor | | $v_{12}(k) = Ri(k)$ | |
| 2 | Induktor | | $v_{12}(k) = \frac{L}{T}(i(k) - i(k-1))$ | |
| 3 | Kapasitor | | $v_{12}(k) = \frac{T}{C}i(k) + E(k-1)$ | |
| 4 | Sumber Arus | | $i(k) = I_0$ | |
| 5 | Sumber Tegangan | | $v_{12}(k) = E_0$ | |
| 6 | Baterai | | $v_{12}(k) = E_0 + R_i i(k)$ | |
| 7 | Ground | | $v(k) = 0$ | |
| 8 | Saklar | | ON | $v_{12}(k) = 0$ |
| | | | OFF | $i(k) = 0$ |



Gambar 8 Rangkaian RC

Terdapat 4 node (termasuk ground) dalam rangkaian gambar 8. Node A,B, C, dan Ground diberi berturut-turut label Node 1, 2, 3, dan 4 (gambar 9). Selanjutnya data sambungan (node) tersebut dinyatakan dalam sebuah matriks berdasarkan hukum Kirchhoff untuk arus (tabel 6)



Gambar 9 Arah arus

Tabel 6 Sambungan antar elemen

| No. | Elemen | Node | Arus |
|-----|-----------------|------|-------|
| 1 | Sumber Tegangan | 1 4 | I_1 |
| 2 | Saklar | 1 2 | I_2 |
| 3 | Resistor | 2 3 | I_3 |
| 4 | Kapasitor | 3 4 | I_4 |

Hubungan arus-arus dalam tabel 6 dapat dinyatakan sebagai:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1(k) \\ i_2(k) \\ i_3(k) \\ i_4(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Model diskrit dari tiap-tiap elemen ditunjukkan dalam tabel 7.

Tabel 7 Model diskrit tiap elemen

| No. | Elemen | Model diskrit |
|-----|-----------------|--|
| 1 | Sumber Tegangan | $v_1(k) - v_4(k) = E$ |
| 2 | Saklar (ON) | $v_1(k) - v_2(k) = 0$ |
| 3 | Resistor | $v_2(k) - v_3(k) - Ri(k) = 0$ |
| 4 | Kapasitor | $v_3(k) - v_4(k) - \frac{T}{C}i(k) = E(k-1)$ |
| 5 | Ground | $v_4(k) = 0$ |

Model diskrit dari rangkaian ditunjukkan pada persamaan matriks melalui penyederhanaan indeks k dihilangkan dan indeks $k-1$ diganti dengan memberi indeks 0, sebagai:

$$MX = C_0 \quad (13)$$

dimana

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -R & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -T/C \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$X = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4 \ i_1 \ i_2 \ i_3 \ i_4]^T$$

$$C_0 = [E \ 0 \ 0 \ E_0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

Penyelesaian persamaan rekursif tersebut merupakan tegangan atau arus sebagai fungsi waktu yang secara matematis dinyatakan sebagai:

$$X(k) = M^{-1}C_0(k) \quad (14)$$

Nilai $C_0(k)$ merupakan nilai yang berubah, karena muatan pengisian atau pengosongan dalam kapasitor (atau mungkin arus induktor jika ada dalam rangkaian).

Dalam kasus ini, nilai

$$C_0(k) = C_0(k) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{i_c T}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

4.2. Hasil Simulasi

4.2.1. Mode Tunak

Untuk mensimulasikan rangkaian listrik dengan mode DC, langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Membuat skema rangkaian di dalam halaman kerja, meliputi peletakan elemen-elemen (sumber, resistor-resistor, dan ground), menghubungkan ujung-ujung elemen dengan kawat penghubung, memberi label tiap node, dan mengedit nilai-nilai elemen sesuai yang ditentukan.
2. Menjalankan proses simulasi dengan menekan START, dan memilih node yang dari tegangan atau ujung arus yang akan dicari.

Gambar 10 menunjukkan hasil simulasi untuk mencari besar tegangan di node B dari persoalan dengan skema rangkaian seperti terlihat pada gambar 6. Dari simulasi diperoleh bahwa tegangan dari node A,B, dan C adalah sebagai:

$$v_A = 20V \quad v_B = 9.3V \quad v_C = 11.93V$$

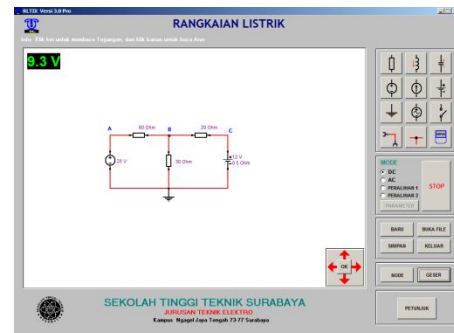
Sedang arus di setiap elemen adalah sebagai berikut:

Arus sumber tegangan $20V = 0.178A$

Arus resistor $60\Omega = 0.178A$ (dari A ke B)

Arus resistor $20\Omega = 0.132A$ (dari C ke B)

Arus resistor $30\Omega = 0.31A$ (dari B ke Ground)

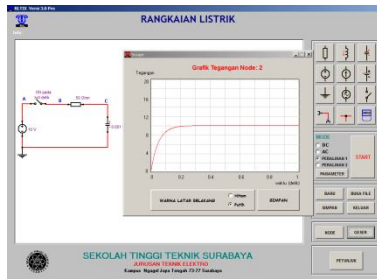


Gambar 10 Simulasi rangkaian dengan mode tunak

4.2.2. Mode Peralihan

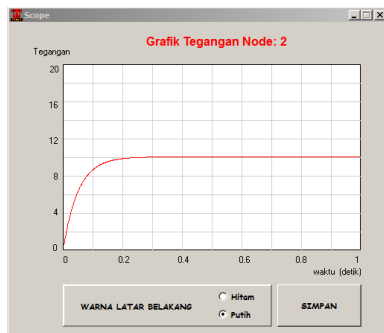
Untuk mensimulasikan rangkaian listrik dengan mode Peralihan (*transient*), langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Membuat skema rangkaian di dalam halaman kerja, meliputi peletakan elemen-elemen (sumber, resistor, kapasitor, saklar dan ground), menghubungkan ujung-ujung elemen dengan kawat penghubung, memberi label tiap node, dan mengedit nilai-nilai elemen sesuai yang ditentukan.
2. Menjalankan proses simulasi dengan menekan START, dan memilih node yang dari tegangan atau ujung arus yang akan dicari.

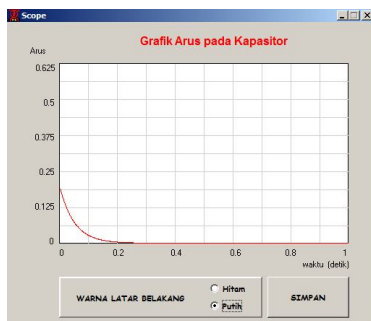


Gambar 11 Simulasi Mode Peralihan

Gambar 11 menunjukkan hasil simulasi untuk mencari besar tegangan di node C dari persoalan dengan skema rangkaian seperti gambar 9. Dalam skema rangkaian tersebut tegangan sumber adalah 10V, resistansi $R=50\Omega$, dan kapasitansi $C = 0.001$ farad. Gambar 12 menunjukkan grafik tegangan di node C, serta gambar 13 adalah grafik arus yang mengalir pada kapasitor.



Gambar 12 Grafik tegangan pada node C



Gambar 13 Grafik arus kapasitor

5. Kesimpulan

Model matematika untuk semua elemen (sumber tegangan, sumber arus, resistor, induktor, kapasitor, dan saklar) dalam rangkaian listrik pada program simulasi RLTIX 3.0 mempunyai bentuk persamaan yang sama, baik untuk mode DC maupun mode peralihan. Rangkaian listrik yang terdiri dari beberapa elemen dapat dinyatakan dalam sebuah persamaan matriks yang diselesaikan dalam algoritma Gauss-Jordan. Metode pendekatan dengan menggunakan *backward-difference* memberikan hasil yang cukup presisi jika periode sampling yang dipilih adalah kecil.

Daftar Pustaka

- [1] Lambert M.Surhone, Mariam T, Susan H, 2011, *Altium Designer Electronic Design Automation*, Betascript Publishing.
- [2] Adams John, 2001, *Mastering Electronics Workbench*, McGraw-Hill.
- [3] Krol G Paul, 1998, *Inside OrCAD Capture*, OnwardPress.
- [4] Mitzner Kraig, 2007, *Complete PCB Design Using OrCAD Capture and Layout*, Newness Publisher.
- [5] Halliday, David, Resnick Robert, Jearl, 2001, *Fundamentals of Physics*, John Wiley and Sons, Inc.
- [6] Alexander and Sadiku, 2009, *Fundamentals of Electric Circuits*, McGrawHill Higher Education.
- [7] Richard Wolfson, 2012, *Essential University Physics*, Addison Wesley, Second Edition.
- [8] Jim Defranza and Daniel Gegliardi, 2009, *Introduction to Linear Algebra with Applications*, Higher Education, McGraw Hill Publisher.

Biodata Penulis

Hari Sutiksno, memperoleh gelar Sarjana Teknik (Ir), Jurusan Teknik Elektro Teknik Tenaga, di ITS, lulus tahun 1981. Tahun 2001 memperoleh gelar Magister Teknik (M.T) dari Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Industri ITS. Saat ini sebagai pengajar pada Sekolah Tinggi Teknik Surabaya..

Francisca Haryanti Chandra, memperoleh gelar Sarjana Teknik (Ir) Jurusan Teknik Elektronika di ITS, lulus 1977. Tahun 1997 memperoleh gelar Magister Teknik (M.,T) dari jurusan Elektro Faktultas Teknik Industri. Pada tahun 2010 memperoleh gelar Doktor dalam bidang Teknologi Pembelajaran dari Universitas Negeri Malang. Saat ini sebagai staf pengajar pada Sekolah Tinggi Teknik Surabaya.

Anastasia Savitri, memperoleh gelar Sarjana Teknik (Ir), Jurusan Teknik Elektro Teknik Telekomunikasi di ITS, lulus tahun 1985. Tahun 2001 memperoleh gelar Magister Teknik (M.T) dari Fakultas Teknik Industri ITS. Saat ini sebagai pengajar pada Sekolah Tinggi Teknik Surabaya (STTS)

Setya Ardhi, memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST), Jurusan Teknik Elektro, di STTS, lulus tahun 2005. Tahun 2009 memperoleh gelar Magister Komputer (M.Kom) dari Fakultas Teknologi Informasi STTS. Saat ini sebagai pengajar pada Sekolah Tinggi Teknik Surabaya. (STTS)