

STUDI KARAKTERISTIK LISTRIK PEMBANGKIT PLASMA PADA MESIN BERKAS ELEKTRON PULSA

Widdi Usada, Suryadi, Aminus Salam, Agus Purwadi
PTAPB - BATAN

ABSTRAK

STUDI KARAKTERISTIK LISTRIK PEMBANGKIT PLASMA PADA MESIN BERKAS ELEKTRON PULSA. Mesin berkas elektron pulsa pada umumnya mempunyai arus yang besar, maka tidaklah mungkin menyediakan sumber elektron berarus besar dengan teknologi termoelektrik. Untuk itu digunakan plasma sebagai sumber elektron. Plasma dengan kerapatan besar dapat diperoleh dengan melucutkan kapasitor bank seperti yang dipelajari dalam makalah ini.

Kata kunci : plasma, mesin berkas elektron pulsa

ABSTRACT

ELECTRICAL CHARACTERISTIC STUDY OF PLASMA GENERATOR FOR PULSE ELECTRON BEAM MACHINE. In general, pulse electron beam machine has a very high current, so it is not possible to provide high current electron beam by thermoelectric technology. For this purpose, plasma should be generated as electron source. High density plasma can be achieved by discharging capacitor bank as being studied in this paper.

Key words : plasma, pulse electron beam machine

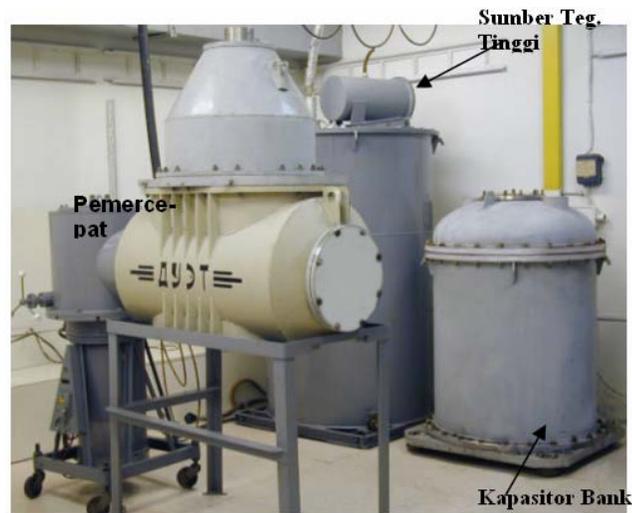
PENDAHULUAN

Peranan Mesin Berkas Elektron (MBE) di berbagai bidang seperti industri, kesehatan dan lingkungan, serta pangan tidak dapat diragukan lagi. Sebagai contoh untuk industri kayu, ban otomotif, perlakuan MBE dipermukaan bahan industri tersebut memperkuat ketahanan permukaan kayu dan ban, serta mempercantik permukaan tersebut. Di bidang kesehatan dan pangan, dengan MBE maka berbagai jenis produk makanan dan minuman dapat diperpanjang umur simpannya. Limbah cair dari rumah sakit maupun industri, dengan MBE ini, nilai BOD dan COD dapat direduksi sedemikian rupa sehingga limbah yang sudah mengalami perlakuan, layak untuk dibuang di badan sungai. Kandungan SO_x dan NO_x hasil gas buang industri PLTB (*Pusat Listrik Tenaga Batu Bara*) dapat ditekan dengan memanfaatkan MBE sehingga pencemaran udara disekitar PLTB tersebut terhindarkan. Meskipun mempunyai peranan yang sangat besar dengan jangkauan yang luas, pemakaian MBE terkendala dengan modalitas awal, sebagai contoh untuk industri PLTB, maka sekitar 10 % modal diperuntukan untuk menyediakan fasilitas piranti tersebut. Kendala lain adalah kerumitan sistem MBE yang terdiri dari modul sumber elektron, modul pemokus berkas elektron, modul pemercepat, modul pemayar dan modul vakum. Khususnya modul sumber elektron, sampai sejauh ini hanya teknologi termolistrik yang digunakan dalam MBE, sehingga membatasi besarnya arus elektron.

Untuk mengatasi masalah di atas khususnya untuk memperkecil biaya modalitas dan ukuran besarnya, maka usaha yang dilakukan adalah bagaimana memperoleh arus elektron cukup besar, yang langsung dapat dipercepat tanpa melalui tabung pemercepat maupun sistem pengendali berkas elektron. Tentu saja dengan pengurangan ukuran tabung pemercepat, maka tegangan atau energi luaran berkas elektron luaran juga kecil (dalam orde puluhan sampai sekitar 200 keV) sehingga kemampuan mesin tersebut terbatas. Keterbatasan piranti ini adalah bahwa mode operasinya tidak lagi kontinyu, namun dalam bentuk pulsa-pulsa, oleh karena itu piranti tersebut dapat disebut pula sebagai mesin berkas elektron pulsa.

Dengan teknologi di atas, perusahaan Nagata Seiki Cop., Ltd, yang salah satu usahanya dalam industri lateks,^[1] menggunakan piranti tersebut untuk perlakuan karet. Penggunaan pulsa-pulsa listrik saat ini banyak digunakan untuk memper-lama umur simpan beras dan produk makanan.^[2-4] Gambar 1. memperlihatkan piranti tersebut. Dari Gambar 1, maka mesin berkas elektron pulsa tersebut dapat diperinci menjadi beberapa modul, yaitu modul sumber daya penghasil plasma, modul sumber daya pemercepat, modul tabung plasma, dan modul sistem vakum. Modul tabung plasma terinci menjadi dua bagian yaitu ruang pembentuk plasma, dan sistem penyaring elektron atau grid.

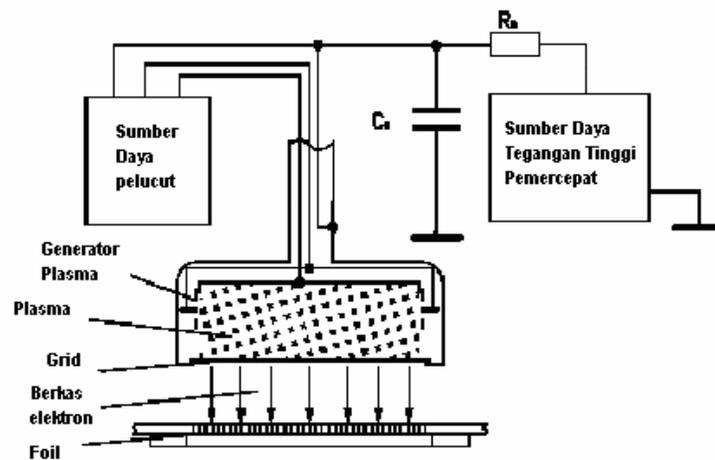
Parameter alat tersebut ditunjukkan pada Tabel 1. Gambar 2. memperlihatkan skema piranti mesin berkas elektron pulsa.



Gambar 1. Mesin berkas elektron pulsa yang di perusahaan Nagata Seiki Co., Ltd.

Tabel 1. Parameter Mesin Berkas Elektron Pulsa.

No.	Parameter	Nilai
1.	Tenaga Elektron dipercepat	100 – 200 keV
2.	Arus berkas	di atas 100 A
3.	Panjang pulsa	40 μ detik
4.	Frekuensi ulangan pulsa	0.1 – 50 Hz
5.	Luasan iradiasi berkas	150 x 650 mm ²
6.	Konsumsi daya	Maks 10 kW
7.	Parameter independen	Tegangan pemercepat, arus berkas, panjang pulsa, dan frekuensi
8.	Pemeliharaan	Bebas pemeliharaan sumber berkas karena tanpa filamen
9.	Keuntungan	Kemungkinan luasan iradiasi diperluas



Gambar 2. Skema mesin berkas elektron pulsa.

Modul sumber daya pelucut terdiri dari kapasitor bank C_B yang terlebih dahulu diberi muatan oleh sumber tegangan tinggi. Aliran muatan ke tabung plasma dikendalikan oleh sistem saklar terkendali. Bila tegangan cukup memadai untuk melucutkan tabung plasma, maka plasma akan dibentuk dalam tabung plasma setelah saklar menutup sehingga terjadi aliran muatan dari kapasitor C_B . Kemudian tegangan tinggi pemercepat dengan kutub positif akan mempercepat elektron dan sekaligus menolak partikel plasma bermuatan positif.

Untuk tahun 2008, di PTAPB-BATAN diharapkan dapat dibuat sistem sumber elektron pulsa sebagai salah satu pemercepat energi rendah berarus besar, dan kelompok teknologi plasma ditugaskan untuk mewujudkan program tersebut di atas. Menyongsong program tersebut, dalam makalah ini akan dipelajari karakteristik rangkaian ekuivalen sistem sumber plasma sebelum mengalami percepatan.

RANGKAIAN EKIVALEN PLASMA SUMBER ELEKTRON

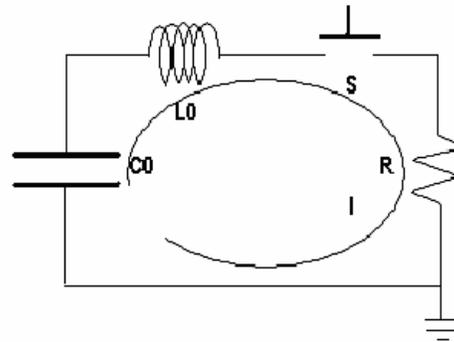
Dari prinsip kerja piranti mesin berkas elektron pulsa seperti ditunjukkan di Gambar 1 dan 2, maka dapat disusun rangkaian ekuivalen sistem pelucutan plasmanya seperti pada Gambar 3.

Bila saklar S ditutup, maka muatan di kapasitor C_0 akan mengalir ke tabung plasma yang diwakili beban R. Persamaan perpindahan muatan adalah sebagai berikut^[5]

$$V_0 = L_0 \frac{dI}{dt} + IR + \int Idt \tag{1}$$

dengan periode osilasi T , impedansi Z serta besarnya arus maksimum I_{maks} memenuhi persamaan berikut ini,

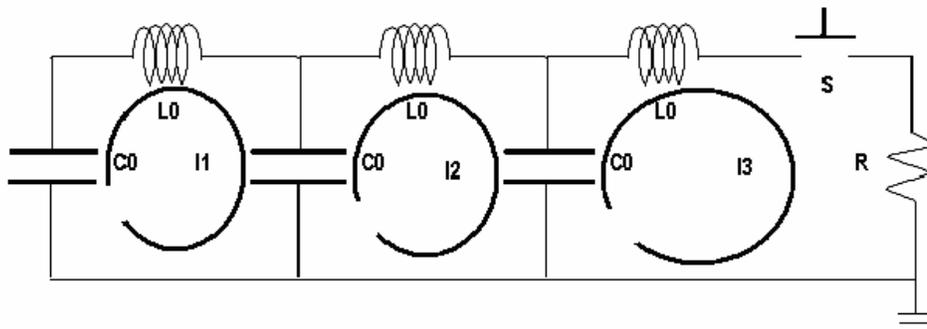
$$\begin{aligned} T &= 2\pi \sqrt{L_0 C_0} \\ Z &= \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \\ I_{maks} &= \frac{V_0}{Z} \end{aligned} \tag{2}$$



Gambar 3. Rangkaian ekuivalen lucutan plasma.

RANGKAIAN EKIVALEN PLASMA SUMBER ELEKTRON DENGAN 3 KAPASITOR

Pada umumnya untuk memperpanjang umur peluruhan lucutan untuk setiap lucutan maka rangkaian RLC tidak hanya memuat 1 kapasitor bank C_0 saja tetapi beberapa kapasitor yang dirangkai secara paralel seperti ditunjukkan Gambar 4. Gambar 4 memperlihatkan rangkaian ekuivalen lucutan plasma dengan tiga buah kapasitor yang dipasang paralel.



Gambar 4. Rangkaian lucutan dengan 3 kapasitor dipasang secara paralel.

Dengan cara yang sama, dapat disusun persamaan di masing-masing untai (*loop*) sebagai berikut

Untai 1

$$V_0 - L_0 \frac{dI_1}{dt} - \frac{\int I_1 dt}{C_0} + V_0 - \frac{\int I_1 dt}{C_0} + \frac{\int I_2 dt}{C_0} = 0 \quad (3)$$

Untai 2

$$V_0 - L_0 \frac{dI_2}{dt} - \frac{\int I_2 dt}{C_0} + V_0 - \frac{\int I_2 dt}{C_0} + \frac{\int I_3 dt}{C_0} + \frac{\int I_1 dt}{C_0} = 0 \quad (4)$$

Untai 3

$$V_0 - L_0 \frac{dI_3}{dt} - \frac{\int I_3 dt}{C_0} - I_3 R + \frac{\int I_2 dt}{C_0} = 0 \quad (5)$$

PENYELESAIAN

Untuk mengetahui karakteristik rangkaian tersebut di atas maka perlu menyelesaikan persamaan (3) sampai dengan (5). Salah satu metode penyelesaian adalah secara komputasi. Untuk keperluan komputasi, persamaan (3), (4) dan (5) disederhanakan dalam bentuk persamaan ternormalisasi, dengan faktor normalisasinya adalah

$$i_{1,2,3} = \frac{I_{1,2,3}}{I_0}, I_0 = \frac{V_0}{\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{t}{t_0}, t_0 = \sqrt{L_0 C_0}, \alpha = \frac{R}{\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}}$$

dengan faktor-faktor tersebut di atas persamaan (3), (4) dan (5) berubah menjadi

$$2 - \frac{di_1}{d\tau} - 2 \int i_1 d\tau + \int i_2 d\tau = 0 \quad (7)$$

$$2 - \frac{di_2}{d\tau} - 2 \int i_2 d\tau + \int i_3 d\tau + \int i_1 d\tau = 0 \quad (8)$$

$$1 - \frac{di_3}{d\tau} - \int i_3 d\tau - \alpha i_3 + \int i_2 d\tau = 0 \quad (9)$$

Persamaan rangkaian ekuivalen plasma sumber elektron dengan 3 kapasitor ternormalisasi yang diwakili oleh persamaan (7), (8), dan (9) dapat diselesaikan dengan menggunakan banyak perangkat lunak salah satunya digunakan perangkat lunak WATFOR77.

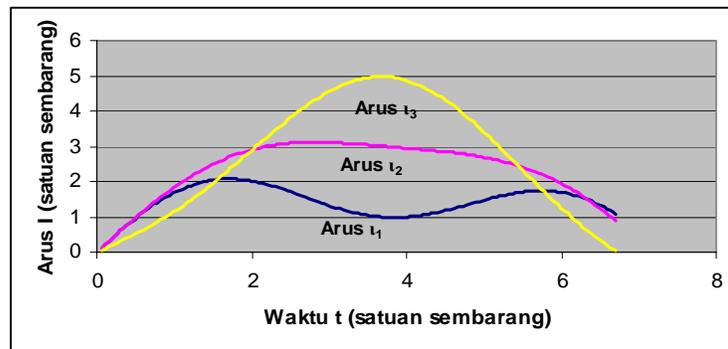
Syarat batas untuk $\tau = 0$ adalah

$$i_{1,2,3} = 0, \frac{di_1}{d\tau} = \frac{di_2}{d\tau} = 2, \frac{di_3}{d\tau} = 1 \quad (10)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebagai variabel bebas adalah waktu ternormalisasi τ dan variabel terikatnya adalah arus ternormalisasi $i_{1,2,3}$, indeks 1,2,3 mewakili untainya. Program dijalankan dengan variasi α yang mewakili hambatan plasma ternormalisasi.

Gambar 5 menunjukkan arus di masing-masing untai dengan hambatan $\alpha = 0$. Tampak bahwa arus i_3 paling besar di antara i_2 dan i_1 namun mempunyai lebar pulsa yang lebih besar ($3.5 \tau_0$) dibanding dengan lebar pulsa arus di untai 1 ($2 \tau_0$ untuk untai1) tetapi lebih kecil dibanding untai 2 ($4.5 \tau_0$ untuk untai 2). Disini tampak bahwa efek penambahan kapasitor secara paralel adalah memperpanjang lebar pulsa arus.



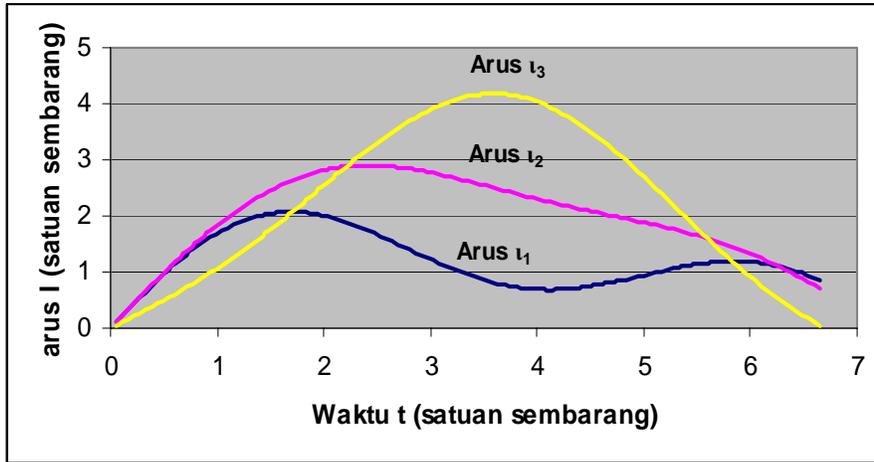
Gambar 5. Karakteristik arus i_3 , i_2 dan i_1 sebagai fungsi waktu τ untuk $\alpha = 0$.

Gambar 6 menunjukkan karakteristik arus di masing-masing untai dengan $\alpha = 0.2$. Dengan adanya hambatan kecil arus di untai 3 t_3 memang masih cukup besar dibanding kedua untai lainnya namun sudah mengalami penurunan, dan lebar pulsanya sedikit membesar dibanding bila tanpa beban.

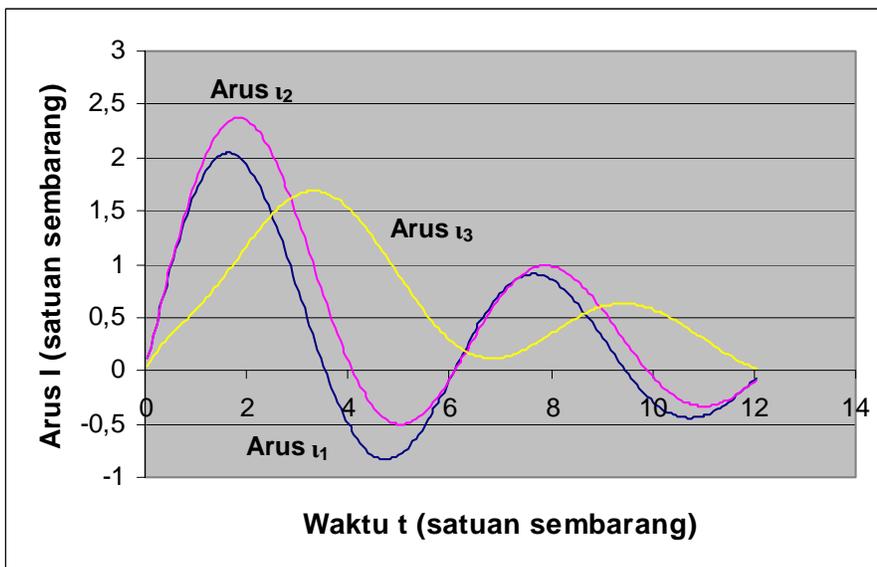
Gambar 7 menunjukkan arus di masing-masing untai dengan hambatan $\alpha = 2$. Tampak

bahwa arus t_3 paling kecil di antara t_2 dan t_1 namun mempunyai lebar pulsa yang lebih besar ($3.6 \tau_0$) dibanding dengan lebar pulsa arus di untai lainnya ($2.3 \tau_0$ untuk untai 1 dan $2.6 \tau_0$ untuk untai 2).

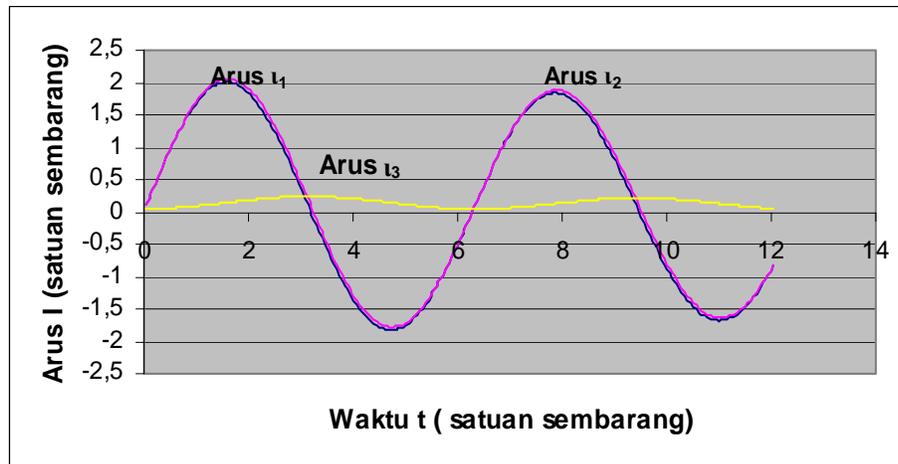
Untuk $\alpha = 20$ karakteristik arus di masing-masing untai diperlihatkan Gambar 8. Tampak bahwa arus di untai 1 dan 2 beresilasi biasa tanpa terasa ada beban, sedangkan di untai 3, arus t_3 nilainya sangat kecil namun pulsanya lebar.



Gambar 6. Karakteristik arus t_3 , t_2 dan t_1 sebagai fungsi waktu τ untuk $\alpha = 0.2$.



Gambar 7. Karakteristik arus t_3 , t_2 dan t_1 sebagai fungsi waktu τ untuk $\alpha = 2$.



Gambar 8. Karakteristik arus i_3 , i_2 dan i_1 sebagai fungsi waktu τ untuk $\alpha = 20$.

Dari data tertampil pada gambar-gambar di atas maka bila bebannya makin besar, tampak bahwa lebar pulsa untai ke tiga juga melebar, namun arusnya semakin mengecil. Demikian pula untuk beban yang semakin besar maka laju kenaikan arus di untai ke tiga juga semakin lambat.

Untuk lebih mudah dalam menggambarkan karakteristik listrik dari rangkaian ekuivalen tersebut maka ingin diketahui berapa besar waktu dan arus serta tegangan senyatanya dalam suatu eksperimen, untuk itu disini akan diberikan contohnya. Bila $C_0 = 9 \mu\text{F}$ dan $L_0 = 9 \mu\text{H}$ dan tegangan $V_0 = 5 \text{ kV}$, maka selanjutnya dapat dihitung besarnya lebar pulsa, arus, dari rangkaian yang telah dirancang, yaitu sebagai berikut :

$$t_0 = \sqrt{L_0 C_0} = \sqrt{9 \times 9} = 9 \mu\text{detik}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = 1 \Omega$$

$$I_0 = \frac{V_0}{Z_0} = 5 \text{ kA}$$

KESIMPULAN

Dengan teknologi plasma maka dapat diperoleh mesin berkas elektron pulsa yang

mempunyai arus besar. Karakteristik listrik plasma yang dibangkitkan oleh lucutan kapasitor dianalisis dengan rangkaian ekuivalennya. Jadi analisis rangkaian ekuivalen ini dapat dimanfaatkan dalam merancang lucutan plasma pada mesin berkas elektron pulsa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] PURWADI, R., *Application of Plasma-Cathode Electron Beam for Large Area Treatment of Natural Rubber*, Nagata Seiki, Co, October 2006.
- [2] ELLIN DOYLE, M., *Use of Pulsed Electric Fields and Electrolyzed Oxidizing Water to Control Listeria*, Food Research Institute, UW-Madison, October 1999.
- [3] IRENE E. POL, ET AL, *Pulsed-Electric Field Treatment Enhances the Bactericidal Action of Nisin Against Bacillus Cereus*, APPLIED AND ENVIRONMENTAL, vol 66, no. 1, Jan. 2000.
- [4] DADANG SUHENDAR ET AL., *Security System of Stable Food Supply in Japanese Agriculture*, PROCEEDINGS OF THE 9TH SCIENTIFIC MEETING, TEMU ILMIAH TI-IX PPI 2000, ISSN 0918-7685.
- [5] LEE, S., *Pulsed Electronic Modular Devices*, ASPEN-UNESCO, ISBN 967-99993, 1986.

LAMPIRAN

WATFOR-77 V1.4 (c) 1986 - WATCOM Systems Inc. 07/09/19 11:57:35

Options: xtype,list,extensions,warnings,terminal,check

```

C      PROGRAM LUCUTAN KAPASITOR DENGAN MATRIKS
C      N JUMLAH UNTAI RANGKAIAN R,L,C
C      UNTAI 1 SAMPAI N-1 TERDIRI RANGKAIAN CLC
C      SEDANGKAN UNTAI N TERDIRI RANGKAIAN R,L,C
C      R ADALAH TAHANAN BEBAN
1      DIMENSION ARUS(10),RI(10),V(10),Q(10)
2      NWR1=1
3      OPEN(UNIT=NWR1,FILE='D:C300.PRN')
4      N=3
5      T=0
6 5    DO 100 N=1,3
7      ARUS(N)=0
8      Q(N)=0
9      IF (N.EQ.3) GOTO 40
10     RI(N)=2
11 40   RI(4)=1
12     WRITE(*,20) N,ARUS(N),RI(N)
13 20   FORMAT(3X,I5,3X,F5.3,3X,F5.3)
14 100  CONTINUE
15     RES=0.0
16     DT=0.005
17 50   DO 60 K=0,10
18     T=T+DT
19 70   DO 80 N=1,3
20     ARUS(N)=ARUS(N)+RI(N)*DT
21     Q(N)=Q(N)+ARUS(N)*DT+0.5*RI(N)*DT*DT
22     IF (N.EQ.1) GOTO 95
23     IF (N.EQ.3) GOTO 90
24     RI(N)=2-2*Q(N)+Q(N+1)+Q(N-1)
25 90   RI(3)=1-RES*ARUS(3)-Q(3)+Q(2)
26 95   RI(1)=2-2*Q(1)+Q(2)
27 80   CONTINUE
28 60   CONTINUE
29     WRITE(*,110)T,ARUS(1),ARUS(2),ARUS(3),ARUS(4)
30     WRITE(NWR1,110)T,ARUS(1),ARUS(2),ARUS(3),ARUS(4)
31 110  FORMAT(3X,F8.3,3X,F8.3,3X,F8.3,3X,F8.3,3X,F8.3)
32     IF (T.GT.12) GOTO 120
33     GOTO 50
34 120  CLOSE(NWR1)
35     STOP
36     END

```

```

Compile time:          00.00  Execution time:          01.37
Size of object code:   988    Number of extensions:    0
Size of local data area(s): 297  Number of warnings:      0
Size of global data area: 160  Number of errors:        0
Object/Dynamic bytes  free:359819/44253  Statements Executed:
46891

```

TANYA JAWAB

Utaya

- Kalau 5 kV saya kira terlalu rendah untuk dianggap sebagai akselerator.
- Bagaimana membuang panas yang timbul?

Widdi Usada

- Memang benar 5 kV bukan sebagai tegangan pemercepat. Tegangan 5 kV disini untuk membangkitkan plasma pulsa, jadi bukan tegangan pemercepatnya.
- Saya belum tahu cara membuang panasnya. Perlu kami sampaikan bahwa memang daya besar namun energi per pulsanya tidak terlalu besar karena lebar pulsa dalam MBE ini dalam orde mikrodetik

Tri Marji Atmono

- Apa kelebihan MBE pulsa dibandingkan MBE kontinyu, apakah juga bisa diaplikasikan untuk iradiasi lateks dan menetralsir SO_x dan NO_x .
- Apakah ada semacam inovasi membuat atau menjadikan MBE pulsa menjadi kontinyu.

Widdi Usada

- Kelebihan MBE pulsa dibandingkan MBE kontinyu adalah arus yang dihasilkan jauh lebih besar daripada MBE kontinyu, bandingkan untuk MBE kontinyu kisaran dalam orde puluhan mA sedangkan untuk MBE pulsa dapat dalam orde ratusan A. Juga teknologi MBE pulsa lebih sederhana dibandingkan teknologi MBE kontinyu. Memang benar MBE pulsa ini dapat diaplikasikan untuk industri lateks, tetapi untuk menetralsir SO_x dan NO_x maaf kami belum tahu.
- Maaf kami belum tahu perkembangan inovasi teknologi dari pulsa dijadikan kontinyu.

Suyamto

- Apakah dasar pengambilan asumsi $C = 9\mu F$ dan $L = 9\mu H$, sebab rasanya terlalu kecil dibandingkan dengan 9 μ kalau dijadikan reaktansi.

Widdi Usada

- Contoh diatas hanyalah pengambilan sembarang, bukan dalam usaha untuk merancang MBE pulsa. Dalam plasma pulsa yang kami jumpai sehari-hari kami terbiasa berbicara dalam orde μF dan μH , dan memang kita menghendaki reaktansinya kecil dalam orde Ohm saja. Maaf pengambilan angka mengganggu Bapak.

Apri Susanto

- Kenapa pada pembuatan MBE pulsa dengan plasma biaya lebih ringan?

Widdi Usada

- Memang kami memperkirakan biaya lebih ringan bahwa karena teknologi relatif sederhana yaitu teknologi pembangkitan plasma kemudian pemercepatan, kami melihat MBE kontinyu mempunyai teknologi yang lebih rumit. Biasanya teknologi yang rumit akan memberikan harga yang tinggi.

Rill Isaris

- Jika sumber yang saudara acu adalah desain MBE pulsa Nagata, apakah tidak bisa dikemukakan SPECT yang bisa dipakai sebagai dasar untuk pertimbangan studi untuk merancang alat tersebut.
- Mungkin juga perlu dipikirkan aspek lain dari perencanaan alat dengan daya cukup besar ini (MW) disipasi panasnya.

Widdi Usada

- Memang kami sudah menanyakan kepada Bapak Dr. Purwadi yang kebetulan beliau presentasi beberapa waktu yang lalu di PTAPB, tetapi beliau belum tahu SPECT dari gambar yang ditayangkan. Saran Bapak kami ucapkan terima kasih.
- Terima kasih atas saran Bapak, memang kami belum sampai memikirkan sejauh itu khususnya aspek mereduksi panas.