

KALIBRASI SUMBER TEGANGAN TINGGI COCKCROFT WALTON 150 kV

Sri Sulamdari

Pusat Penelitian Nuklir Yogyakarta - Badan Tenaga Atom Nasional

ABSTRAK

KALIBRASI SUMBER TEGANGAN TINGGI COCKCROFT WALTON 150 kV. Telah dibuat generator tegangan tinggi Cockcroft Walton 7 tingkat untuk meningkatkan arus ion mesin implantor ion. Tiap tingkat dari generator tegangan tinggi Cockcroft Walton digunakan dioda tegangan tinggi 30 kV/1A, kapasitor tegangan tinggi $(0,247 \pm 0,05) \mu\text{F}/30 \text{ kV}$, dan elektroda berbentuk ring dari baja tahan karat dengan diameter $28 \times 82 \text{ cm}$. Uji coba yang dilakukan dengan memvariasi beban terhadap tegangan keluaran dari generator Cockcroft Walton disajikan. Hasil yang diperoleh dengan beban $153 \text{ M}\Omega$ tegangan masukan $11,55 \text{ kV}$, pada tingkat ke 7 tegangan keluaran terukur mampu $(161 \pm 0,07) \text{ kV}$ sedangkan tegangan keluaran secara teori menunjukkan $(161,70 \pm 1,75) \text{ kV}$. Kalibrasi tegangan tinggi standar Hipotronics terhadap meter arus disajikan.

ABSTRACT

CALIBRATION OF THE 150 kV COCKCROFT WALTON HIGH VOLTAGE. The Cockcroft Walton high voltage generator of seven stages for increase of ion current in the ion implantation machine has been made. Each stage of Cockcroft Walton high voltage generator used high voltage diodes of 30 kV/1A, high voltage capacitor of $(0.247 \pm 0.05) \mu\text{F}/30 \text{ kV}$, and the ring electrode of stainless steel material with $28 \times 82 \text{ cm}$ in diameter. The performance of the machine which was tested by varying load through the output voltage is presented. The experimental result showed that the measured output voltage at 7 stages can achieve at $(161 \pm 0.07) \text{ kV}$ for the load at $153 \text{ M}\Omega$, and for the input voltage at $11,55 \text{ kV}$. The theoretical results at these conditions provide the output voltage at $(161.70 \pm 1.75) \text{ kV}$. The calibration of the home made current meter by the high voltage standard of Hipotronics is presented in this paper.

PENDAHULUAN

Generator Cockcroft Walton merupakan pengganda tegangan (voltage multiplier) yang terdiri dari 2 baris kapasitor (sebelah kiri dan kanan) yang dihubungkan dengan dioda-dioda tegangan tinggi. Generator ini pada umumnya menghasilkan tegangan searah yang tidak terlalu tinggi, akan tetapi dapat menghasilkan arus yang cukup besar. Generator ini terdiri dari tiga komponen yaitu kapasitor tegangan tinggi, dioda tegangan tinggi serta generator pulsa. Di sini kapasitor dan generator pulsa dibuat sendiri dengan bahan yang ada di pasaran. Generator tegangan tinggi Cockcroft Walton dilengkapi dengan sebuah terminal bentuk donat yang dibuat dari baja tahan karat disangga dengan kolom paralon.

Adapun tujuan penelitian ini adalah mengkalibrasi tegangan keluaran generator Cockcroft Walton. Akan tetapi berhubung meter tegangan tinggi di pasaran yang ada hanya mempunyai kemampuan maksimum 35 kV maka perlu dibuat alat ukur tegangan tinggi buatan sendiri yang dikalibrasi dengan sumber tegangan

tinggi standar (Hipotronics). Di sini digunakan meter arus DC mikroamper tipe KYORITSU KM 152. Untuk itu diperlukan tahanan tinggi yang gunanya untuk merubah tegangan menjadi arus listrik.

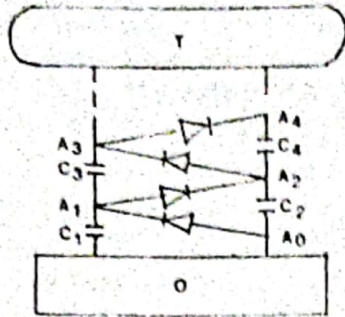
TEORI

Tegangan keluaran generator Cockcroft Walton dapat dijelaskan sebagai berikut.

Bila osilator dihidupkan maka terjadi perubahan tegangan pada diagram pengganda tegangan di atas (Gambar 1).

Pada saat tegangan di titik A_0 adalah $+V_m$ kapasitor C_1 dimuati melalui dioda D_1 sehingga tegangan di $A_1 = V_m$.

Pada saat tegangan di titik A_0 adalah $-V_m$, kapasitor C_2 dimuati melalui D_2 sehingga tegangan di titik A_2 sebesar $2 V_m$. Pada saat titik A_0 kembali $+V_m$, maka titik A_3 menjadi $3 V_m$ karena C_3 dimuati melalui D_3 . Pada saat titik A_0 kembali $-V_m$, maka titik A_4 menjadi $4 V_m$ karena C_4 dimuati melalui D_4 . Demikian seterusnya akhirnya $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$



Gambar 1. Diagram generator Cockcroft Walton

Keterangan:

O= osilator, D= dioda, C= kapasitor, T= terminal

tegangannya masing-masing $2 V_m$. Menurut Griggs, dkk [1], tegangan keluaran $V = 2n V_m$ (1), V_m = tegangan puncak osilator; n = banyak tingkat. Jadi untuk meningkatkan tegangan dapat diperoleh dengan cara menaikkan banyaknya tingkat n . Akan tetapi transmisi muatan dari tingkat dasar ke tingkat paling atas menyebabkan adanya penurunan tegangan yang besarnya:

$$\Delta V = \frac{I}{f c} \left(\frac{2n^3}{3} + \frac{n^2}{2} - \frac{n}{6} \right) \quad (2)$$

ΔV = penurunan tegangan; I = arus beban generator Cockcroft Walton; f = frekuensi kerja osilator; c = kapasitan perkapasitor

Maka besar tegangan keluaran maksimum:

$$V_{\text{maks}} = 2n V_m - \frac{I}{f c} \left(\frac{2n^3}{3} + \frac{n^2}{2} - \frac{n}{6} \right) \quad (3)$$

Banyaknya tingkat optimum untuk tegangan keluaran maksimum diperoleh dengan mendiferensialkan persamaan terakhir.

$\frac{d V_{\text{maks}}}{d n} = 0$ diperoleh n optimum:

$$n_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{V M f c}{I}}$$

Pada generator Cockcroft Walton terdapat riak yang besarnya:

$$\Delta V = \frac{I}{f c} \left(n^2 + \frac{n}{2} \right)$$

Berdasarkan rumus di atas dapat dilihat bahwa untuk memperkecil penurunan tegangan harus diusahakan supaya nilai $f c$ besar. Dari segi ekonomis maka menaikkan harga f adalah lebih menguntungkan yaitu dengan membuat frekuensi osilator sebesar mungkin. (Pada saat ini peralatan kami hanya mampu 1000 Hz). Membuat nilai c besar adalah tidak ekonomis

karena harga suatu kapasitor akan lebih mahal bila kapasitannya besar.

Generator Cockcroft Walton terdiri dari tiga komponen yaitu kapasitor, dioda tegangan tinggi serta generator pulsa. Di sini kapasitor dan generator pulsa dibuat sendiri dengan bahan yang ada di pasaran.

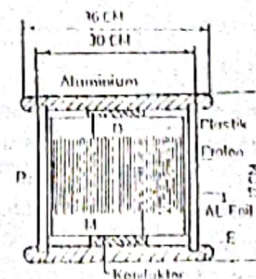
Komponen utama Generator Cockcroft Walton

Kapasitor tegangan tinggi [2]

Tegangan keluaran dari generator Cockcroft Walton besarnya adalah $V = 2n V_m$ di mana V_m = tegangan puncak osilator daya, n = banyak tingkat. Di muka telah diterangkan bahwa kapasitor yang dirangkai pada pengganda tegangannya masing-masing adalah $2 V_m$. Jadi kapasitor yang dipakai harus mempunyai tegangan kerja paling sedikit 2 kali V_m atau dengan kata lain V_m paling besar setengah dari tegangan kerja kapasitor. Tegangan kerja kapasitor 30 kV.

Kapasitor tegangan tinggi yang digunakan dalam penelitian ini adalah buatan sendiri merupakan kapasitor lempeng dengan foil aluminium sebagai elektroda, digulung hingga merupakan suatu torak (Gambar 2).

Hasil perhitungan harga kapasitan kapasitor tegangan tinggi buatan sendiri secara terukur rata-rata adalah $(0,247 \pm 0,05) \mu F/30 \text{ kV}$.



Gambar 2. Diagram kapasitor tegangan tinggi
D= dielektrikum; E= elektroda; M= minyak; P= tempat pelindung

Dioda tegangan tinggi

Dioda tegangan tinggi yang dirangkai pada rangkaian generator Cockcroft Walton ini harus mempunyai tegangan dadal sama dengan dadal kapasitor tegangan tinggi yang dipakai. Saat ini tegangan puncak osilator daya adalah 12,5 kV, jadi tegangan kerja kapasitor diharapkan paling sedikit 25 kV.

Dioda tegangan tinggi dibuat dari dioda 1000 volt yang dirangkai seri sehingga untuk membuat suatu dioda tegangan tinggi dengan tegangan dadal 25 kV diperlukan minimal 30

buah dioda (> 25 buah dioda). Dioda mempunyai kemampuan dilewati arus hingga 1A, maka arus sebesar 2 mA yang diberikan generator Cockcroft Walton sama sekali tidak berarti.

Generator Cockcroft Walton disebut juga pengganda tegangan yaitu suatu sistem kapasitor dan dioda disusun sepanjang kolom generator Cockcroft Walton dengan penyangga 2 buah papan gelas pleksi tebalnya 1,5 cm. Kolom generator dibuat bentuknya sedemikian sehingga sistem pengganda tegangan cukup kompak dan mudah diperbaiki bila terdapat suatu kerusakan pada kapasitor maupun dioda tegangan tinggi.

Generator tegangan tinggi dilengkapi dengan sebuah terminal bentuk donat yang dibuat dari baja tahan karat diameter 28 x 82 cm disangga dengan kolom paralon. Di mana 28 cm adalah diameter lengkungan kecil, sedangkan 82 cm adalah diameter lengkungan besar.

Generator pulsa [3]

Persamaan 3 menunjukkan bahwa tegangan keluaran akan makin besar dan riak semakin kecil bila frekuensi osilator makin besar dan kapasitan makin besar. Membuat kapasitor dengan kapasitan besar dengan dimensi kecil adalah sulit maka adalah sangat menguntungkan bila frekuensi osilator besar. Dalam penelitian ini telah dibuat generator pulsa bertenaga 500 watt, frekuensi 1000 Hz yaitu frekuensi optimal yang dicapai sampai saat ini.

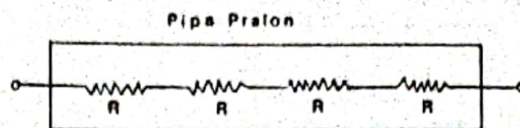
Pembuatan tahanan ukur tegangan tinggi

Untuk mengukur tegangan tinggi Cockcroft Walton kita belum mempunyai alat ukur tegangan tinggi standar. Di sini digunakan meter arus DC mikroampere tipe KYORITSU KM 152. Untuk itu diperlukan tahanan tinggi yang gunanya untuk mengubah tegangan menjadi arus listrik. Tahanan yang digunakan adalah 10 M Ω diseri banyak, sehingga diperoleh tahanan pengganti kurang lebih 3000 M Ω . Tahanan ukur ini dimasukkan ke dalam pipa paralon PVC, agar menjamin keselamatan pekerja. Gambar 3 memperlihatkan tahanan yang dibuat dengan beberapa tahanan yang dapat diperoleh di pasaran.

Semua tahanan yang dipakai adalah M Ω 0,5 watt dengan toleransi 5%.

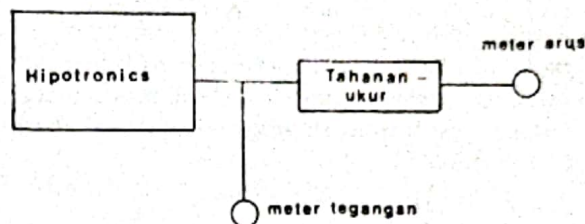
Kalibrasi tahanan ukur tegangan tinggi

Sebelum tahanan ukur tegangan tinggi digunakan dalam pengukuran, terlebih dahulu tahanan ini perlu dikalibrasi dengan sumber tegangan tinggi standar (Hipotronics). Hal ini



Gambar 3. Tahanan ukur tegangan tinggi

dimaksudkan agar dalam pengukuran yang sebenarnya diperoleh harga yang akurat dan mendekati kebenaran. Adapun cara mengkalibrasi tahanan tersebut seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Kalibrasi tahanan ukur tegangan tinggi

Contoh kalibrasi ini diperoleh nilai konversi bahwa setiap tegangan 3000 V pada sumber standar sama dengan 1 μ A. Besar tahanan ukur 3000 M Ω .

Cara-cara pengukuran tegangan tinggi Cockcroft Walton

Pengukuran tegangan tinggi dilakukan dengan menggunakan voltmeter tegangan tinggi buatan sendiri dengan faktor konversi seperti diuraikan sebagai berikut.

Kalibrasi meter ukur

Dalam percobaan kita menggunakan meter ukur dengan skala penuh 50 μ A. Di sini setiap tingkat tahanan ukur (probe) yang dipakai berbeda-beda yaitu: Tingkat I tahanan probe 500 M ohm, kalibrasi meter ukur 1 μ A = 0,5 kV sumber standar, Tingkat II tahanan probe 1000 M Ω , kalibrasi meter ukur 1 μ A = 1 kV sumber standar. Tingkat III tahanan probe 1500 M Ω , kalibrasi meter ukur 1 μ A = 1,5 kV sumber tegangan. Tingkat IV tahanan probe 2000 m Ω , kalibrasi meter ukur 1 μ A = 2 kV sumber standar. Tingkat V tahanan probe 2500 M Ω , kalibrasi meter ukur 1 μ A = 2,5 kV sumber standar. Tingkat VI tahanan probe 3000 M Ω , kalibrasi meter ukur 1 μ A = 3 kV sumber standar. Ting-

kat VII tahanan probe 3500 MΩ, kalibrasi meter ukur 1 μA = 3,5 kV sumber standar.

Contoh:

1. Untuk tingkat I

Tahanan probe 500 MΩ

Skala penuh meter ukur: 50 μA

$$V = I \cdot R = 25 \text{ kV}$$

$$I = \frac{25000 \text{ V}}{500 \cdot 10^6 \text{ A}} = 50 \text{ μA}$$

Jadi dengan probe 500 MΩ, kalibrasi

$$1 \text{ μA} = 0,5 \text{ kV}$$

2. Untuk tegangan keluaran 150 kV

Bila tahanan probe 500 MΩ

$$I = \frac{150.000 \text{ V}}{500 \cdot 10^6 \text{ A}} = 0,3 \text{ mA}$$

padahal skala penuh meter ukur 50 μA, jadi tahanan probe harus ditambah (atau meter harus diganti dengan yang mempunyai skala penuh 0,3 mA).

Pengukuran tegangan tinggi

Berdasarkan kalibrasi meter ukur untuk tegangan 175 kV diperlukan 50 buah tahanan yang besarnya 3500 mΩ dapat dilihat pada Gambar 5.

Beban-beban tersebut di atas dipakai tahanan 1 MΩ paralel 3, kemudian diseri 450 buah supaya sesuai dengan tahanan dan tenaga yang diinginkan. Sebagai contoh untuk pengukuran ralat: yaitu pengukuran tegangan tinggi Cockcroft Walton pada beban 153 MΩ tegangan masukan $V_m = 11,55 \text{ kV}$ (dapat dilihat pada Tabel 3).

Untuk data: frekuensi = 1000 Hz, kapasitan = 0,28 μF, V keluaran teori = $2n V_m$, untuk $n = 7$. Arus yang lewat beban:

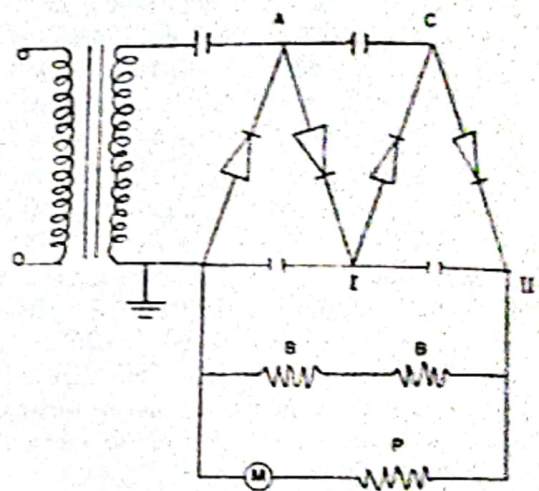
$$I = \frac{V}{R} = \frac{161700 \text{ V}}{153 \cdot 10^6 \text{ Ω}} = 1,057. \text{ Arus yang lewat}$$

$$\text{alat ukur} = \frac{161000 \text{ V}}{3500 \cdot 10^{-6} \text{ Ω}} = 46 \text{ μA. Jadi arus}$$

total = 1,103 mA. Secara teori rumus penurunan tegangan:

$$\Delta V = \frac{I}{fC} \left(\frac{2n^3}{3} + \frac{1n^2}{2} - \frac{1n}{6} \right)$$

$$= \frac{1,096 \cdot 10^{-3}}{1000 \cdot 0,28 \cdot 10^{-6}} (252) = 992,7 \text{ V}$$



Gambar 5. Cara pengukuran sumber tegangan tinggi Cockcroft Walton; M = mikroamperemeter; P = tahanan probe; B = tahanan beban

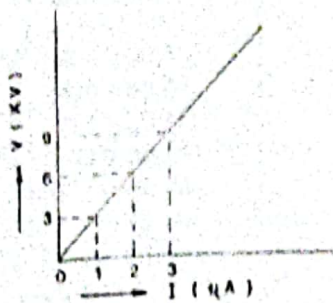
Tabel 3. Hasil pengukuran tegangan tinggi Cockcroft Walton dengan beban 153 MΩ, tegangan masukan 11,55 kV

Tingkat	V teori (kV)	Δ V teori (kV)	V _{masuk} teori (kV)	V terukur (kV)
I	23,10 ± 0,25	10 ⁻³	23,99	23,10 ± 0,10
II	46,20 ± 0,50	8.10 ⁻³	46,20	46,20 ± 0,07
III	69,30 ± 0,75	40.10 ⁻³	69,29	66,65 ± 0,07
IV	92,40 ± 1,00	10 ⁻¹	92,28	93,20 ± 0,13
V	115,50 ± 1,25	3.10 ⁻¹	115,11	115,50 ± 0,10
VI	138,60 ± 1,50	5.10 ⁻¹	138,05	135,25 ± 0,03
VII	161,70 ± 1,75	1	160,99	161,00 ± 0,07

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran berbentuk:

1. Grafik 1 sampai dengan 3
2. Data diberikan pada Tabel 1 sampai dengan 3



Grafik 1. Kalibrasi sumber tegangan tinggi standar Hipotronics terhadap meter arus.

Grafik 1 merupakan hasil kalibrasi sumber tegangan tinggi standar (hipotonics) terhadap meter arus (Tabel 1). Tahanan ukur yang dipakai adalah $3000 \text{ M}\Omega$ setiap pengukuran $1 \mu\text{A}$ sama dengan 3 kV .

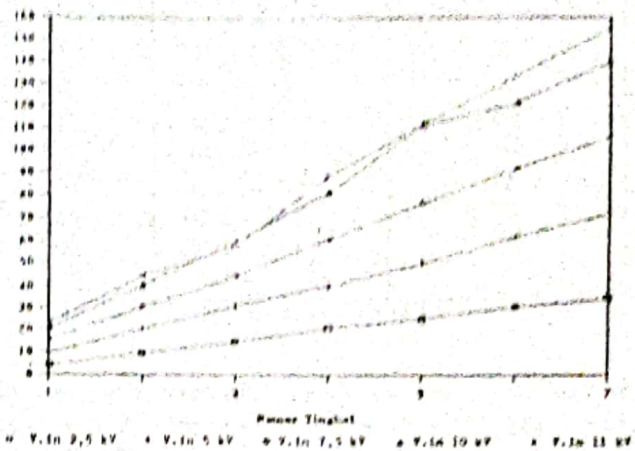
Tabel 1. Hasil kalibrasi sumber tegangan tinggi standar (hipotonics) terhadap meter arus. DC mikroamper tipe KYORITSU KM 152. Tahanan ukur yang dipakai adalah $3000 \text{ M}\Omega$ setiap pengukuran $1 \mu\text{A}$.

Sumber standar (kV)	meter arus (μA)
3	1
6	2
9	3

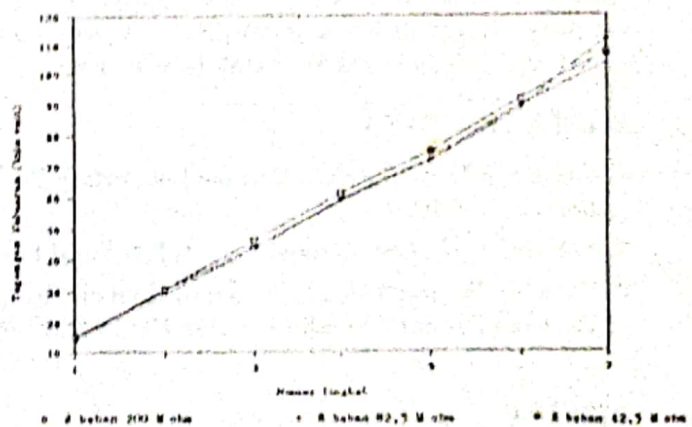
dan seterusnya setiap kenaikan 3 kV arus bertambah $1 \mu\text{A}$.

Grafik 2 dan Grafik 3 merupakan grafik tegangan keluaran generator Cockcroft Walton terhadap nomor tingkat.

Dari Tabel 2 dan 3 dapat dilihat bahwa harga tegangan keluaran tiap tingkat secara teori terhadap tegangan keluaran secara terukur terdapat perbedaan yang tidak menyolok. Perbedaan itu disebabkan antara lain: harga-harga kapasitan dan dioda yang terpasang pada



Grafik 2. Tegangan keluaran generator Cockcroft Walton vs nomor tingkat dengan beban tetap $200 \text{ M}\Omega$. V masukan: $2,5 \text{ kV}$; 5 kV ; $7,5 \text{ kV}$; 10 kV ; 11 kV



Grafik 3. Tegangan keluaran generator Cockcroft Walton vs nomor tingkat dengan V masukan tetap $7,5 \text{ kV}$ untuk R beban: $200 \text{ M}\Omega$; $82,5 \text{ M}\Omega$; $42,5 \text{ M}\Omega$.

untai berbeda-beda (meskipun kekuatan dioda yang tertera dari pabrik sama).

Peninjauan dari grafik 2: untuk V masukan makin naik (di atas $7,5 \text{ kV}$) kelihatan grafik ada pembelokan. Hal ini disebabkan karena

Tabel 2. Hasil pengukuran tegangan tinggi Cockroft-Walton tanpa beban. V masukan = 11 kV.

Tingkat	V teori (kV)	ΔV teori (kV)	V_{maks} teori (kV)	V terukur (kV)
I	$22 \pm 0,25$	2.10^{-3}	21,99	$22,50 \pm 0,30$
II	$44 \pm 0,50$	1.10^{-3}	43,99	
III	$66 \pm 0,75$	3.10^{-3}	65,99	$63,00 \pm 0,50$
IV	$88 \pm 1,00$	8.10^{-3}	87,99	$87,00 \pm 0,50$
V	$110 \pm 1,25$	15.10^{-3}	109,98	$111,00 \pm 1,00$
VI	$132 \pm 1,50$	25.10^{-3}	131,97	$132,00 \pm 1,00$
VII	$154 \pm 1,75$	40.10^{-3}	153,96	$154,00 \pm 3,50$

harga-harga kapasitan dari kapasitor yang terpasang pada rangkaian Cockroft Walton tidak homogen. Peninjauan dari Grafik 3: terlihat bahwa untuk R beban yang relatif rendah kelihatan adanya pembelokan yang menyolok. Jadi dapat disimpulkan bahwa makin besar beban makin ada kestabilan V keluaran.

KESIMPULAN

Telah dibangun unit sumber tegangan tinggi Cockroft Walton 7 tingkat dengan menggunakan dioda tegangan tinggi 30 kV, kapasitor tegangan tinggi ($0,247 \pm 0,05$) $\mu F/30$ kV dan elektroda dari baja tahan karat bentuk ring

diameter 28 x 82 cm. Dari grafik 2 sampai dengan 3 dapat disimpulkan bahwa makin besar beban makin stabil tegangan keluaran dan untuk $V_{masukan}$ di atas 7.5 kV tegangan keluaran kelihatan tidak linier karena harga-harga kapasitan dari kapasitor yang terpasang pada unit Cockroft Walton tidak homogen.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Sdr. Drs. Tono Wibowo, Sunarto, Murtidjan, Heri Sudarmanto, Agus Tri Purwanto yang telah membantu dalam konstruksi, pengujian alat dan penyelesaian karya tulis ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Graggs, J.D et. al., High Voltage Laboratory Technique, Butter Worths Scientific Publication, London (1954).
2. Yohannes, H., Listrik dan Magnet, P N Balai Pustaka, Jakarta (1978).
3. Yayasan Pembina Pendidikan dan Hobi elektronika Binatronika, Proyek penggunaan IC 555. Yayasan Pembina Pendidikan dan Hobi Elektronika Binatronika

DISKUSI

Sugiri.F:

Apakah pernah dicoba tegangan tinggi dari jala-jala PLN misalnya 380 V/20kV dengan menggunakan sistem *switching* karena mungkin efisiensi bisa lebih baik.

Sri Sulamdari:

Belum.

Budiono:

1. Apakah tegangan dioda sudah diperhitungkan?
2. Berapa *ripple* faktor yang diberikan oleh *output* tegangan tinggi?
3. Dari *probe* yang digunakan apakah sudah dipasang filter, seberapa jauh derau *output* dari yang diukur?.

Sri Sulamdari:

1. Sudah, yaitu 1 kV
2. *Ripple* faktornya sudah diperhitungkan
3. Belum, hanya filter *probe* saja belum diukur deraunya

Harjoto:

1. Apakah tujuan pembuatan pencepat Cockcroft Walton?
2. Mengingat akan tujuan penggunaannya apakah alat ini sudah memenuhi persyaratan?
3. Ion apa saja yang akan dipercepat?

Sri Sulamdari:

1. Untuk melengkapi unit akselerator implanter ion di PPNY-BATAN
2. Sudah, karena akselerator implanter ion membutuhkan tegangan minimum 10 kV
3. Ion fosfor dan boron