

PERANCANGAN OSILATOR DAYA UNTUK PENINGKATAN KAPASITAS TEGANGAN PEMERCEPAT MESIN IMPLANTOR ION

Djoko S. Pudjorahardjo, Suprpto, Djasiman, Irianto
Puslitbang Teknologi Maju, BATAN, Yogyakarta

ABSTRAK

PERANCANGAN OSILATOR DAYA UNTUK PENINGKATAN KAPASITAS TEGANGAN PEMERCEPAT MESIN IMPLANTOR ION. Untuk memenuhi kebutuhan energi ion pada aplikasi perlakuan permukaan bahan, khususnya untuk meningkatkan ketahanan bahan terhadap oksidasi suhu tinggi, telah dilakukan perancangan osilator daya untuk peningkatan tegangan pemercepat pada mesin implantor ion. Kegiatan ini dilakukan karena generator Cockroft-Walton sebagai sumber tegangan tinggi untuk pemercepat ion hanya mampu menghasilkan tegangan tinggi stabil sampai 100 kV. Sedangkan kebutuhan energi ion untuk aplikasi tersebut minimal 150 keV, sehingga diperlukan tegangan pemercepat stabil minimal 150 kV. Peningkatan tegangan pemercepat dilakukan dengan meningkatkan kapasitas osilator daya sebagai bagian dari generator Cockroft-Walton. Konstruksi osilator daya yang lama dengan frekuensi osilasi di bawah 1 kHz dan komponen utama transistor BUX 48A direkonstruksi menggunakan komponen utama tabung trioda ITL 5-1 sehingga frekuensi osilasinya menjadi 25 kHz. Untuk menunjang operasi tabung trioda tersebut maka telah dibuat sumber daya anoda 4500V/3A dan sumber daya filamen 6V/40A. Osilator daya juga dilengkapi dengan trafo frekuensi tinggi sehingga tegangan keluaran maksimum dari osilator daya dapat mencapai 15 kV.

Kata kunci : osilator daya, implantor ion

ABSTRACT

DESIGN OF POWER OSCILLATOR FOR IMPROVING THE CAPACITY OF ACCELERATING VOLTAGE OF ION IMPLANTATION MACHINE. The power oscillator has been designed for improving the capacity of accelerating voltage of ion implantation machine in such away for fulfilling the need of ion energy for surface treatment application, especially for improving the high temperature oxidation resistance. The improvement is due to the capacity limit of Cockroft-Walton generator as source of accelerating high voltage. It produces stable high voltage only up to 100 kV, whereas the minimum ion energy needed in the surface treatment application is 150 keV. Therefore a stable high voltage of 150 kV is needed. The improvement of accelerating voltage is implemented by improving the capacity of power oscillator as part of Cockroft-Walton generator, i.e. by reconstructing the power oscillator using ITL 5-1-triode tube so that the oscillation frequency will be 25 kHz. For the operation of the triode tube, the anode and filament power supplies are fabricated with the capacity of 4500V/3A and 6V/40A respectively. The power oscillator is also equipped with high frequency transformer for multiplying the output voltage of triode tube so that the maximum output voltage of power oscillator is 15 kV.

Key words : power oscillator, ion implantor

PENDAHULUAN

Mesin implantor ion yang ada di P3TM adalah akselerator ion pertama hasil litbang teknologi akselerator yang dilakukan beberapa tahun yang lalu di BATAN Yogyakarta yang pada waktu itu bernama Pusat Penelitian Bahan Murni dan Instrumentasi (PPBMI). Hingga saat ini mesin implantor ion telah banyak dimanfaatkan terutama untuk litbang ilmu bahan, baik bahan semikonduktor maupun bahan non semikonduktor atau logam. Dengan mesin implantor ion dapat di-*implant* atau ditanamkan atom-atom tertentu (biasa disebut sebagai atom dopan) pada

suatu bahan untuk tujuan tertentu^[1]. Pada bahan semikonduktor proses implantasi ion digunakan untuk menanamkan atom-atom dopan ke dalam bahan semikonduktor sehingga diperoleh komponen elektronik dengan karakteristik yang khusus^[2]. Sedangkan pada bahan non semikonduktor atau logam proses implantasi ion banyak digunakan untuk proses perlakuan permukaan (*surface treatment*), yaitu untuk mengubah sifat-sifat permukaan bahan dengan menanamkan atom-atom tertentu pada permukaan bahan sehingga diperoleh bahan dengan sifat permukaan yang lebih unggul, misalnya lebih keras, tahan aus, tahan gesekan, tahan terhadap korosi dan oksidasi suhu tinggi^[3].

Keunggulan teknologi implantasi ion untuk perlakuan permukaan bahan dibanding dengan teknologi konvensional (misalnya metode nitridasi, karbonisasi, induksi listrik, dll) antara lain bahwa proses implantasi ion dapat dikerjakan pada suhu kamar sehingga kemungkinan terjadinya *thermal stress* dapat dihindari. Disamping itu prosesnya cepat (dalam orde menit), tidak terjadi perubahan dimensi yang signifikan pada bahan yang di-*treatment*, tidak memerlukan *reheat treatment*, kedalaman penetrasi dan distribusi atom dopan di dalam bahan dapat dikendalikan secara akurat dengan pengendalian tegangan pemercepat, serta kemurnian atom dopan dapat diseleksi secara akurat menggunakan fasilitas analisator massa pada mesin implantor ion.

Atom-atom dopan harus mempunyai energi kinetik yang cukup tinggi agar dapat masuk (penetrasi) ke permukaan suatu bahan. Untuk memberikan energi kinetik pada atom-atom dopan dilakukan dengan cara atom-atom dopan dibentuk menjadi ion-ion sehingga dapat dipercepat menggunakan suatu medan listrik dan mencapai energi kinetik tertentu. Pada mesin implantor ion, pembentukan ion-ion dari atom dopan dilakukan dengan suatu sumber ion. Sedangkan proses pemercepatan ion-ion terjadi di dalam tabung pemercepat. Energi kinetik ion yang dapat dicapai setelah pemercepatan ditentukan oleh tegangan pemercepat yang terpasang pada tabung pemercepat. Energi kinetik ion merupakan faktor penentu kedalaman penetrasi ion pada suatu bahan. Makin tinggi energi kinetik ion, makin dalam penetrasi ion tersebut ke dalam suatu bahan. Faktor lain yang menentukan kedalaman penetrasi ion pada suatu bahan adalah *stopping power* dari bahan tersebut yang didefinisikan sebagai energi kinetik ion yang terserap oleh bahan saat ion tersebut melintasi persatuan panjang bahan.

Kedalaman penetrasi ion untuk perlakuan permukaan bahan, khususnya untuk peningkatan sifat ketahanan terhadap oksidasi suhu tinggi, adalah dalam orde 500 Å. Kedalaman penetrasi ini dapat dicapai oleh ion dengan energi kinetik minimum 150 keV. Mesin implantor ion P3TM menggunakan sumber tegangan tinggi tipe generator Cockroft-Walton sebagai sumber tegangan pemercepat ion. Generator ini hanya mampu menghasilkan tegangan tinggi DC stabil maksimum 100 kV. Sedangkan di atas 100 kV tegangan tinggi DC yang dihasilkan tidak stabil dan hal ini tidak dikehendaki untuk tegangan pemercepat ion. Dengan demikian energi kinetik ion maksimum yang dapat dicapai dengan tegangan pemercepat yang stabil adalah 100 keV. Untuk memenuhi kebutuhan energi kinetik ion minimum 150 keV dalam rangka untuk aplikasi

perlakuan permukaan bahan perlu dilakukan usaha peningkatan energi ion dari 100 keV menjadi minimum 150 keV. Hal ini dilakukan dengan peningkatan kapasitas generator Cockroft-Walton dari semula 100 kV/5 mA menjadi 150 kV/10 mA.

Generator Cockroft-Walton pada prinsipnya terdiri dari bagian **pelipat tegangan** yang berfungsi untuk mengubah tegangan AC dari PLN menjadi tegangan tinggi DC dengan cara menggandakan (*multiplier*) dan menyearahkan (*rectifier*) tegangan AC dari PLN, dan bagian **osilator daya** yang berfungsi sebagai sumber tegangan masukan untuk bagian pelipat tegangan. Peningkatan kapasitas generator Cockroft-Walton dilakukan dengan cara meningkatkan kapasitas bagian osilator daya. Sedangkan bagian pelipat tegangan yang ada sekarang dengan jumlah tingkat $n = 9$ dipandang sudah cukup untuk memenuhi kebutuhan tegangan tinggi DC 150 kV. Pelipat tegangan terdiri dari komponen dioda dan kapasitor tegangan tinggi yang masing-masing mempunyai kapasitas 50 kV/3 A dan 50 kV/0,22 μ F. Dengan masukan tegangan osilasi sekitar 10 kV akan dapat dihasilkan tegangan tinggi DC lebih dari 150 kV. Pada makalah ini disampaikan hasil rancangan osilator daya untuk meningkatkan kemampuan generator Cockroft-Walton sebagai sumber tegangan tinggi pada mesin implantor ion dalam rangka untuk peningkatan energi ion. Disamping itu disampaikan juga status saat ini dari pelaksanaan kegiatan tersebut.

RANCANGAN OSILATOR DAYA

Osilator daya merupakan sumber tegangan osilasi sebagai tegangan masukan pada bagian pelipat tegangan generator Cockroft-Walton. Peningkatan kapasitas osilator daya dilakukan dengan mengganti komponen utama rangkaian osilator daya yang berupa transistor BUX 48A dengan tabung trioda ITL 5-1. Tabung trioda dipilih karena mempunyai keunggulan dibanding dengan transistor, yaitu mempunyai kapasitas tegangan dan arus kerja lebih besar, serta lebih tahan terhadap tegangan lebih (*over voltage*) dan arus lebih (*over current*) sehingga resiko kerusakan dapat dikurangi.

Rangkaian osilator daya yang dirancang seperti ditampilkan pada Gambar 1, yaitu jenis osilator *tickler* dengan komponen utama berupa tabung trioda tipe ITL 5-1. Jenis osilator *tickler* dipilih karena kesederhanaannya dalam memperoleh besar dan polaritas tegangan umpan balik positif. Osilator *tickler* menggunakan suatu kumparan sekunder dari trafo RF untuk memperoleh tegangan umpan balik^[4]. Pada rangkaian osilator daya tersebut diatas, T1 adalah trafo RF dimaksud. Trafo

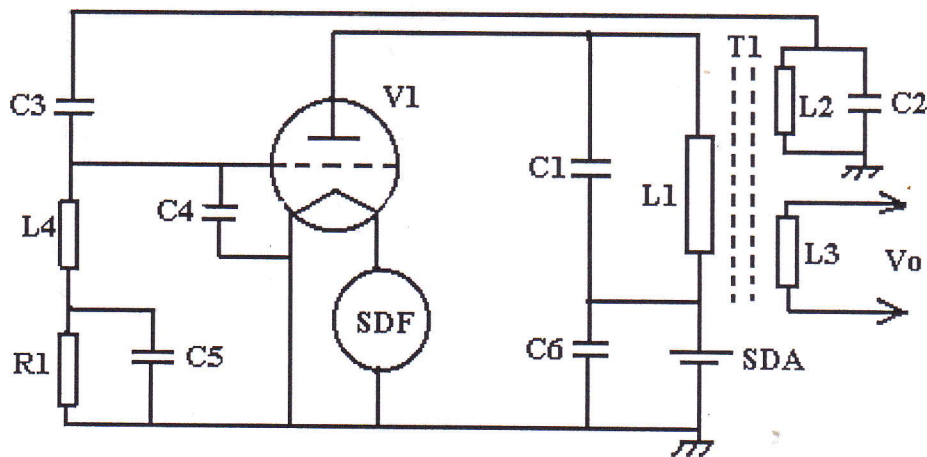
tersebut adalah trafo jenis frekuensi tinggi, sehingga konstruksinya lebih khusus tidak seperti pada trafo biasa untuk frekuensi 50 Hz. Untuk frekuensi sampai dengan 40 kHz trafo tersebut menggunakan inti ferit, sedangkan untuk frekuensi di atas 40 kHz tanpa inti. Sebagai kumparannya digunakan kawat serabut atau *multi wire* agar tahanan AC nya rendah. Untuk mengurangi kapasitansi kumparan, jarak antar kawat lilitan perlu diperbesar.

Trafo RF ini mempunyai tiga buah kumparan yaitu kumparan L1, L2 dan L3. Kumparan L1 merupakan kumparan primer dari trafo RF dan dialiri arus anoda dari sumber daya anoda. Kumparan L1 paralel dengan kapasitor C1

merupakan rangkaian tangki, berfungsi untuk menyimpan tenaga selama perioda aktif dan memberi tenaga selama perioda pasif agar kelangsungan osilasi dapat terjaga. Frekuensi resonansi dari untai tangki menentukan frekuensi keluaran osilator dan besarnya dapat ditentukan dengan persamaan^[4]:

$$f = \frac{159}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

dengan f frekuensi osilasi (kHz), L nilai induktansi rangkaian tangki (μ H), C nilai kapasitansi rangkaian tangki (μ F).



Gambar 1. Rangkaian osilator daya 25 kHz untuk generator Cockcroft-Walton 150 kV/ 20 mA dengan komponen-komponen sebagai berikut:

- | | |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| C1: kapasitor 10 nF/15 kV | L1: kumparan primer dari trafo RF |
| C2: kapasitor 0,01 μ F/10 kV | L2: kumparan perangsang dari trafo RF |
| C3: kapasitor 0,1 μ F/15 kV | L3: kumparan sekunder dari trafo RF |
| C4: kapasitor 400 pF/5 kV | L4: induktor RFC 2,5 mH |
| C5: kapasitor 0,01 μ F/5 kV | SDF: sumber daya filamen |
| C6: kapasitor 10 nF/15 kV | SDA: sumber daya anoda |
| R1: tahanan 1 k Ω /400 W | V1: trioda ITL 5-1 |

Kumparan L2 adalah kumparan perangsang (*tickler coil*) yang memberikan sinyal umpan balik positif ke *grid* melalui kapasitor C3. Dengan mengatur jumlah dan arah lilitan kumparan L2, maka besar tegangan dan polaritas yang sesuai untuk sinyal umpan balik tersebut dapat diperoleh. Tahanan *grid* R1 dan kapasitor C3 dengan tetapan waktu yang jauh lebih besar dari pada periode frekuensi osilasi berfungsi untuk memberikan tegangan bias ke *grid*. Kombinasi C3 dengan penyearah *grid-katoda* berkelakuan sebagai *clamp* atau rangkaian pemegang untuk menghasilkan tegangan DC negatif yang diperlukan untuk

membias *grid-katoda*. Sedangkan kumparan L3 merupakan kumparan sekunder untuk menghasilkan tegangan tinggi yang diperlukan sebagai masukan ke pelipat tegangan generator Cockcroft-Walton.

Kumparan L4 adalah kumparan RFC yang berfungsi untuk mencegah sinyal RF mengalir ke *ground* melalui tahanan R1. Kapasitor keramik C4 yang dipasang antara *grid* dan filamen/katoda berfungsi untuk mengurangi osilasi parasit, yang nilai kapasitansinya dapat diperkirakan menggunakan persamaan sebagai berikut^[4]:

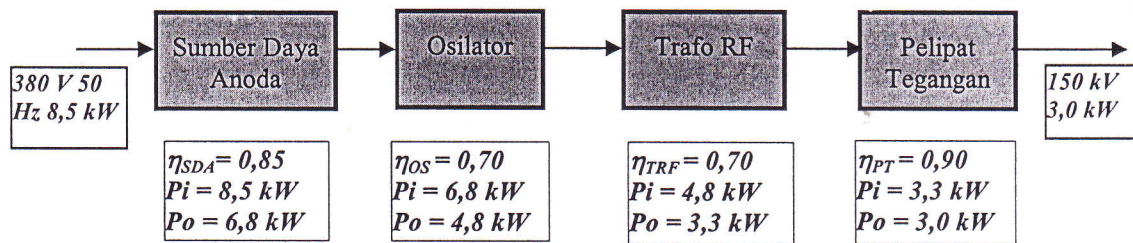
$$C_{gc} = \frac{k P_o}{\sqrt[3]{f}} \quad (2)$$

dengan $C_{gc} = C4$ nilai kapasitansi kapasitor *grid-katoda* (pF), k angka pendekatan (antara 12 sampai 15), P_o daya keluaran nominal osilator (kW), f frekuensi osilator (MHz). Untuk keluaran osilator dengan daya sekitar 7 kW dan frekuensi 25 kHz diperlukan $C_{gc} \approx 500$ pF.

Tabung trioda ITL 5-1 memerlukan sumber daya filamen SDF dan sumber daya anoda SDA masing-masing dengan kapasitas 6 V/40 A dan 4500 V/3 A, serta pendingin anoda menggunakan hembusan udara dari *blower* dengan kapasitas 5 m³/detik. Karena tegangan keluaran langsung dari tabung trioda masih cukup rendah, maka agar diperoleh tegangan osilasi cukup tinggi sesuai kebutuhan perlu adanya suatu trafo peningkat tegangan. Pengaturan tegangan atau daya keluaran osilator sementara dilakukan secara manual menggunakan variak yang dihubungkan secara seri dengan sumber daya anoda.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Osilator daya merupakan bagian dari generator Cockroft-Walton yang berperan sebagai penyedia daya masukan ke bagian pelipat tegangan. Peningkatan kapasitas osilator daya generator Cockroft-Walton pada mesin implantor ion dimaksudkan agar generator Cockroft-Walton tersebut mampu memberikan tegangan tinggi stabil hingga 150 kV untuk memenuhi kebutuhan energi ion pada aplikasi perlakuan permukaan. Peningkatan tersebut dilakukan dengan mengganti konstruksi rangkaian osilator daya yang semula menggunakan komponen utama transistor diganti dengan tabung trioda. Penentuan spesifikasi teknis rangkaian osilator daya dengan pertimbangan bahwa tegangan sinusoidal keluaran dari osilator daya harus mempunyai frekuensi dan amplitudo tegangan yang cukup tinggi (sekitar 15 kV), serta kapasitas osilator daya yang mampu mengatasi beban. Untuk mengetahui kebutuhan kapasitas daya pada setiap bagian dalam struktur generator Cockroft-Walton, maka perlu diketahui alur proses konversi daya mulai dari jala-jala listrik PLN (AC, 3 fase) hingga keluaran generator Cockroft-Walton seperti ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram proses konversi daya pada generator Cockroft-Walton 150 kV/20 mA.

Kapasitas daya generator Cockroft-Walton yang diharapkan setelah ditingkatkan adalah sebesar 3 kW sehingga mampu menyediakan tegangan tinggi 150 kV/20 mA. Dari gambar 2 maka proses konversi daya tersebut adalah sebagai berikut:

- Pelipat tegangan mengubah daya AC frekuensi tinggi dari trafo RF osilator daya menjadi daya DC bertegangan tinggi yaitu keluaran generator dengan efisiensi sekitar 0,90, sehingga untuk daya keluaran $P_o = 3,0$ kW diperlukan daya masukan $P_i = 3,3$ kW.
- Trafo RF mengubah daya AC frekuensi tinggi dari anoda osilator daya yang bertegangan relatif rendah menjadi lebih tinggi dengan perkiraan efisiensi sebesar 0,70, sehingga untuk daya

keluaran $P_o = 3,3$ kW diperlukan daya masukan $P_i = 4,8$ kW.

- Osilator mengubah daya DC menjadi daya AC frekuensi tinggi (RF) melalui tabung trioda ITL 5-1 dengan efisiensi 0,70, sehingga untuk daya keluaran $P_o = 4,8$ kW diperlukan daya masukan $P_i = 6,8$ kW.
- Sumber daya anoda mengubah daya AC 380 V/50 Hz menjadi daya DC melalui trafo daya 3 fase dan rangkaian penyearah dengan perkiraan efisiensi 0,85, sehingga untuk daya keluaran $P_o = 6,8$ kW diperlukan daya masukan $P_i = 8,5$ kW dari jala-jala PLN.

Dari alur konversi daya tersebut maka dapat disimpulkan bahwa untuk memperoleh daya

keluaran dari pelipat tegangan sebesar 3 kW diperlukan daya masukan pada sumber daya anoda sebesar 8,5 kW. Agar osilator daya mempunyai kapasitas daya yang cukup maka perlu didukung dengan sumber daya anoda dan komponen utama yang memadai. Dengan demikian diharapkan osilator daya yang dirancang mampu menyangga kapasitas keluaran generator Cockroft-Walton 150 kV/20 mA.

Rangkaian osilator daya yang dikonstruksi adalah jenis *tickler oscillator*, di mana frekuensi gelombang sinusoidal yang dihasilkan ditentukan oleh untai resonansi yang dibentuk oleh kumparan L2 dan kapasitor C2 (lihat Gambar 1) menurut persamaan (1). Untuk frekuensi yang diharapkan sebesar 25 kHz, maka nilai L2 dan C2 dapat ditentukan. Dengan mengambil nilai C2 sebesar 0,01 μF maka diperoleh nilai L2 sebesar 0,636 mH. Untuk menjaga frekuensi tertentu yang dikehendaki, maka kenaikan nilai C2 harus diimbangi dengan penurunan nilai L2. Oleh karena itu suatu perbandingan L/C perlu dipilih secara eksperimen agar dapat memberikan keluaran bentuk gelombang sinusoidal yang baik.

Komponen utama dari rangkaian osilator daya yang dikonstruksi adalah tabung trioda ITL 5-1 buatan Thomson Tube Electroniques, France. Tabung trioda ini mempunyai kapasitas 10 kW^[5], sehingga untuk daya keluaran osilator maksimum sebesar 4,8 kW seperti direncanakan (lihat Gambar 2) dipandang cukup memadai. Untuk mendukung operasi tabung trioda maka telah dikonstruksi sumber daya filamen berkapasitas 6V/40A dan sumber daya anoda berkapasitas 4500V/3A. Kapasitas tersebut adalah 1,3 kali lebih besar dari kapasitas yang diperlukan secara perhitungan sehingga cukup memadai dan diharapkan keandalan kerja osilator daya sampai pada kondisi beban penuh.

Komponen lainnya adalah trafo keluaran yang berfungsi meningkatkan tegangan osilasi dari osilator daya sehingga sesuai untuk masukan pelipat tegangan. Trafo ini adalah trafo frekuensi tinggi (trafo RF) dengan konstruksi menggunakan inti ferit berdimensi penampang efektif (8×22) cm². Sebagaimana disebutkan di muka bahwa trafo RF terdiri dari 3 kumparan, yaitu:

- Kumparan L1 sebagai kumparan primernya, menggunakan kawat serabut berukuran penampang 4 cm² dengan jumlah lilitan 125.
- Kumparan L2 sebagai kumparan sekunder, menggunakan kawat serabut berukuran 0,75 cm² dengan jumlah lilitan 35.
- Kumparan L3 sebagai kumparan sekunder, menggunakan kawat serabut berukuran 0,75 cm² dengan jumlah lilitan 850.

Kumparan-kumparan tersebut dipasang pada koker terbuat dari bahan pertinik tebal 5 mm, setiap lapisan lilitan kumparan dipasang isolasi dari bahan plastik prespan tebal 0,15 mm. Berdasarkan ukuran kawat yang digunakan untuk kumparan, di mana untuk ukuran 4 cm² mampu mengalirkan arus DC hingga 10 A dan untuk ukuran 0,72 cm² mampu hingga 2 A, maka konstruksi trafo RF tersebut sudah cukup aman karena arus maksimum yang direncanakan pada masing-masing kumparan adalah 2 A untuk kumparan primer dan 0,5 A untuk kumparan sekunder.

Komponen-komponen lainnya berupa kapasitor tegangan tinggi (tegangan kerja sampai dengan 15 kV), dibuat dari bahan plastik prespan tebal 0,15 mm sebagai media dielektrikannya, dan foil aluminium tebal 0,1 mm sebagai elektrodanya. Konstruksinya digulung dan dikemas di dalam pipa pralon. Disamping itu untuk memenuhi kebutuhan tahanan *grid* R1 yang mempunyai kapasitas 1 k Ω /400 W dibuat susunan seri paralel yang terdiri dari 9 buah tahanan nikelin 1 k Ω /50 W.

Volume pekerjaan konstruksi osilator daya meliputi pembuatan komponen sumber daya osilator (sumber daya anoda dan sumber daya filamen), perakitan sumber daya osilator, konstruksi rangkaian osilator, karakterisasi osilator daya dan penyatuannya dengan pelipat tegangan generator Cockroft-Walton. Karena volume kegiatan yang cukup banyak tersebut maka pelaksanaan kegiatan ini dilakukan secara bertahap mulai tahun 2002. Hasil yang telah dicapai pada tahun 2002 adalah pembuatan komponen sumber daya osilator dan perakitannya telah dilaksanakan. Sedangkan sisa pekerjaan masih dilanjutkan pada tahun 2003. Lamanya pengerjaan kegiatan ini juga disebabkan oleh terbatasnya dana yang tersedia di proyek.

KESIMPULAN

Dari uraian tersebut diatas dapat disimpulkan bahwa konstruksi osilator daya seperti yang direncanakan diharapkan cukup memadai untuk menyangga kapasitas generator Cockroft-Walton sebesar 150 kV/20 mA sebagai penyedia tegangan pemercepat ion pada mesin implantor ion. Adapun spesifikasi teknis osilator daya tersebut adalah sebagai berikut:

- Konfigurasi rangkaian: osilator *tickler*
- Komponen utama: tabung trioda ITL 5-1
- Sumber daya anoda: sumber DC 4500V/3A

- Sumber daya filamen: sumber AC 6V/40A
- Gelombang/frekuensi: sinusoidal/25 kHz
- Daya/tegangan keluaran: 4,7 kW/10 kV

Pelaksanaan kegiatan dilakukan secara bertahap karena disamping volume pekerjaan yang cukup banyak, dana yang tersedia juga terbatas. Padahal dana yang diperlukan untuk pengadaan bahan/komponen cukup banyak. Namun demikian diharapkan tahun 2003 ini dapat diselesaikan sehingga kemampuan tegangan pemercepat mesin implantor ion yang ada di P3TM ini dapat ditingkatkan untuk memenuhi kebutuhan energi ion pada aplikasi perlakuan permukaan bahan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada rekan-rekan teknisi di Bidang Akselerator, khususnya Saudara Heri Sudarmanto, Untung Margono, Slamet Riyadi, Sumaji, Mujiono dan Sunarto atas kerjasamanya untuk melaksanakan kegiatan ini.

ACUAN

- [1] RYSEL, H., *et. al.*, *Ion Implantation*, A Wiley Interscience Publication, John Wiley and Sons, New York, 1986.
- [2] SUGIARTO, S., SUDJATMOKO, SULAMDARI, S., *Aplikasi Implantasi Ion Dalam Pembuatan Piranti Semikonduktor*, Prosiding PPNY-BATAN, Yogyakarta, 1995.
- [3] TJIPTO SUJITNO, SUDJATMOKO, *Aplikasi Teknik Implantasi Ion Dalam Industri Baja*, Prosiding Lustrum V FMIPA-UGM, Yogyakarta, 1995.
- [4] DJASIMAN, SUDJATMOKO, SUPRPTO, *Perancangan Osilator Daya Untuk Sumber Tegangan Tinggi Cockroft-Walton 500 kV/20 mA*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, Vol. 1, No. 1, Juli 1999.
- [5] Brosur Thomson Tube Electroniques, Industrial Triode, France, 1994.
- [6] MILMAN & HALKIAS, *Electronic Devices and Circuits*, Mc Graw-Hill, 1967.

TANYA JAWAB

Utaja

- Mengapa tidak stabil, apakah pernah dilakukan analisis penyebabnya?

Djoko SP.

- Penyebab ketidakstabilan pada sistem yang lama antara lain :

- Pada sistem lama hanya menggunakan frekuensi rendah yaitu sekitar 600 Hz (yang direncanakan baru yaitu 25 kHz), sehingga perubahan penurunan tegangannya akan cukup besar terhadap perubahan arus beban sesuai dengan persamaan
$$\Delta V = \frac{I}{fC} \left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{6}n \right),$$

dengan ΔV penurunan tegangan, I arus beban, f frekuensi, C dan n masing-masing nilai kapasitor dan jumlah tingkat pelipat tegangan.

- Untuk menstabilkan luaran diperlukan suatu rangkaian pengendali umpan balik, sementara pada rangkaian yang lama belum dilengkapi.