

PENGUKURAN DISTRIBUSI BERKAS ION KELUARAN MESIN IMPLANTASI ION DI P3TM-BATAN BERBASIS TEKNIK PENGOLAHAN CITRA

Slamet Santosa, Lely Susita RM dan Tono Wibowo

Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Maju, Badan Tenaga Nuklir Nasional

ABSTRAK

PENGUKURAN DISTRIBUSI BERKAS ION KELUARAN MESIN IMPLANTASI ION DI P3TM-BATAN BERBASIS TEKNIK PENGOLAHAN CITRA. Distribusi berkas pada mesin implantasi ion akan berpengaruh pada hasil implantasinya. Ketidakmerataan berkas ion pada sistem target dapat terjadi antara lain karena adanya penyimpangan berkas ion pada sistem pemercepat dan lensa kuadropol yang digunakan. Hal ini menyebabkan spot berkas ion tidak simetri terhadap sumbu aksial dan membentuk simpangan ke arah sumbu X dan Y . Untuk meningkatkan kualitas distribusi berkas pada mesin implantasi ion perlu diketahui simpangan spot berkas ion pada keluaran tabung pemercepat, keluaran lensa kuadropol dan sistem target. Pada makalah ini dilaporkan hasil pengukuran secara langsung distribusi berkas pada mesin implantasi ion di P3TM-BATAN. Pengukuran dilakukan dengan memasang keping target aluminium yang dilapisi kertas kalkir sebagai media perekam data berkas ion pada keluaran sistem pemercepat, keluaran lensa kuadropol dan sistem target mesin implantasi ion. Pengolahan citra dari berkas ion yang dihasilkan dilakukan dengan pemrograman komputer menggunakan Matlab untuk menganalisa distribusinya. Dari histogram citra berkas ion dapat diketahui distribusi berkasnya dan dari perbandingan perhitungan dosis ion pada sistem target menggunakan SRIM didapat kesalahan pengolahan citra berkas ion sekitar 15-20 persen.

Kata kunci: *Implantasi Ion, distribusi berkas ion, histogram pengolahan citra.*

ABSTRACT

ION BEAM DISTRIBUTION MEASUREMENT OF ION IMPLANTATION MACHINE AT P3TM-BATAN BASED ON IMAGE PROCESSING TECHNIQUE. The beam distribution of an ion implantation machine gives an influence toward it implantation results. Un-uniform distribution of ion beam at the target system may exist which affected by the divergence of the beam at the accelerating system and the quadrupole lens as well. This produces an ion beam spot asymmetry toward the axial axis and forming beam deviations into X and Y axes. In order to increase the distribution quality of the ion beam, the beam spot deviations at the output of accelerating tube, the quadrupole lens and the target system should be identified. In this paper the direct measurement results of the beam distributions of an ion implantation machine at P3TM-BATAN are reported. Measurements are done by putting a chip target of aluminum that is layered by a traced paper as a recorder media for ion beam data produced at accelerating tube, at the quadrupole lens and at the target system respectively. Image processing of the beam images is then done by a computer code written in Matlab to analyze their distributions. From the image histograms the distributions of the ion beam can be carried out and from the comparison of ion dose calculation at the target system using SRIM software, an image processing error is found about 15-20 percent.

Key words: *Ion implantation, ion beam distribution, image processing histogram.*

PENDAHULUAN

Implantasi ion adalah metode pencangkokan suatu atom dopan ke dalam bahan lain (substrat/keping-target), dengan cara lang-

sung substrat dibombardir dengan atom dopan dalam bentuk ion berkecepatan tinggi. Usaha pencangkokan dapat terjadi apabila atom dopan mempunyai energi yang cukup tinggi. Agar atom dopan mempunyai energi yang cukup

tinggi, maka atom dopan tersebut dipercepat dengan sistem pemercepat. Supaya atom dopan dapat dipercepat, maka perlu diubah ke dalam fase ion (ionisasi), sehingga penambahan energi kinetik dapat dilakukan dengan melewati ion dopan tersebut pada beda potensial dari sistem pemercepat. Kelebihan teknik implantasi ion dibanding dengan metode pencangkakan yang lain antara lain adalah, kedalaman doping dapat dikendalikan dengan mengatur energi ion, dosis atom dopan dapat dikendalikan dengan mengubah besar arus ion atau lama waktu implantasi. Kemurnian atom dopan dapat dikendalikan dengan seleksi menggunakan magnet pemisah, prosesnya bersih karena dilakukan di dalam ruang hampa, secara teoritis sebarang ion dapat diimplantasikan ke dalam sebarang bahan, tidak terjadi tekanan thermal dan tidak ada perubahan dimensi yang berarti.

Diketahui bahwa partikel bermuatan yang bergerak, dalam hal ini ion dopan, menimbulkan medan magnet di sekitar arus partikel bermuatan tersebut^[1]. Untuk partikel bermuatan yang bergerak pada kawat penghantar lurus, medan magnet menimbulkan garis-garis gaya konsentris di sekitar kawat pada bidang yang tegak lurus dengan arah medan magnet tersebut. Hal demikian juga berlaku untuk partikel bermuatan yang bergerak pada ruang vakum^[2,3]. Medan magnet yang ditimbulkan akan mendorong partikel-partikel bermuatan itu sendiri ke pusat (*self-focusing*). Sedangkan gaya yang ditimbulkan oleh medan magnet tersebut akan saling berlawanan dengan gaya elektrostatik muatan ruang dan resultan gaya-gayanya menimbulkan efek penyebaran radial arus berkas sepanjang lintasannya pada tabung pemercepat. Fenomena tersebut memberikan kenyataan bahwa terjadi penyebaran pada arus berkas partikel bermuatan. Fenomena lain yang memberikan sumbangan sebaran ion dopan adalah hamburan Coulomb. Untuk memfokuskan sebaran berkas ion dopan setelah melalui sistem pemercepat digunakan lensa kuadropol. Lensa kuadropol pada mesin implantasi ion tersusun atas dua blok lensa, dengan masing-masing blok terdiri atas empat lempeng hiperbolik yang tersusun berpasangan, dan tiap pasang dihubungkan dengan sumber tegangan yang dapat divariasikan antara 0 hingga ± 15 kV. Dengan diberikannya tegangan pada lensa, maka akan timbul medan listrik yang akan menimbulkan garis gaya

listrik. Arah garis gaya dan kuat medan pada masing-masing lensa merupakan anti simetris satu sama lain sehingga menarik ion-ion menuju pusat aliran partikel bermuatan sehingga lensa kuadropol berfungsi sebagai pemfokus. Dengan dipasangnya lensa kuadropol maka diharapkan berkas ion dopan akan kembali memfokus. Akan tetapi fungsi pemfokusan lensa kuadropol dapat gagal apabila tegangan yang diberikan pada tiap lempeng hiperbolik lensa mengalami penurunan, sehingga sebaran berkas ion dopan tidak dapat difokuskan sempurna dan berkas ion tidak simetri terhadap sumbu aksial^[4].

Pada makalah ini parameter yang diamati adalah keterarahan dan sebaran berkas ion dopan yang diimplantasikan pada substrat/keping-target. Langkah-langkah pengamatan yang dilakukan adalah dengan pengukuran berkas secara langsung pada keluaran sistem pemercepat, keluaran lensa kuadropol dan pada sistem target mesin implantasi ion. Pengukuran dilakukan dengan memasang keping target aluminium yang dilapisi kertas kalkir sebagai media perekam data berkas ion. Untuk mendapatkan data citra berkas ion dopan, kertas kalkir yang telah terbakar karena proses implantasi di-*scan*, kemudian citra spot dipisahkan dari kertas kalkir dengan cara *cropping* menggunakan AdobePhotoshop^{®[5]}, selanjutnya dimanipulasi menjadi citra hitam putih agar dapat dilakukan *pixel-scanning* dengan pemrograman menggunakan Matlab untuk mendapatkan histogram citra dan menghitung luasan distribusi ionnya. Histogram citra adalah grafik yang memetakan distribusi intensitas dan menyatakan kondisi dinamik harga pixel (*picture element value*) dari citra tersebut^[6]. Data histogram citra berkas ion dopan dapat digunakan untuk mengetahui distribusi ion pada keping target yang dipasang pada satu posisi tertentu dan data perhitungan luas berkas ion dopan dapat digunakan untuk menghitung dosis paparan pada keping target pada satu posisi tertentu. Dengan demikian dapat diketahui distribusi berkas ion dopan pada keluaran sistem pemercepat, keluaran lensa kuadropol dan sistem target. Verifikasi dilakukan dengan membandingkan data dosis pada sistem target yang dihitung dengan hasil simulasi menggunakan SRIM.

TATA KERJA

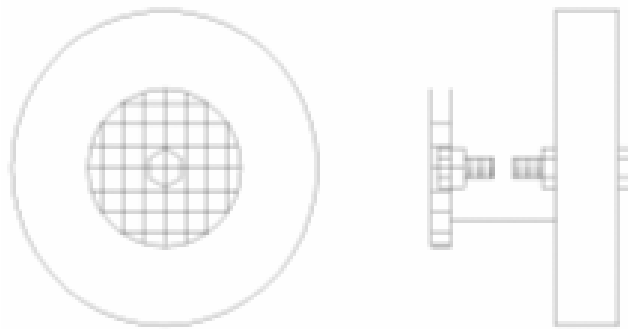
Pengambilan Data Berkas Ion

Pengambilan data berkas ion dopan pada keluaran sistem pemercepat, keluaran lensa kuadropol dan sistem target dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

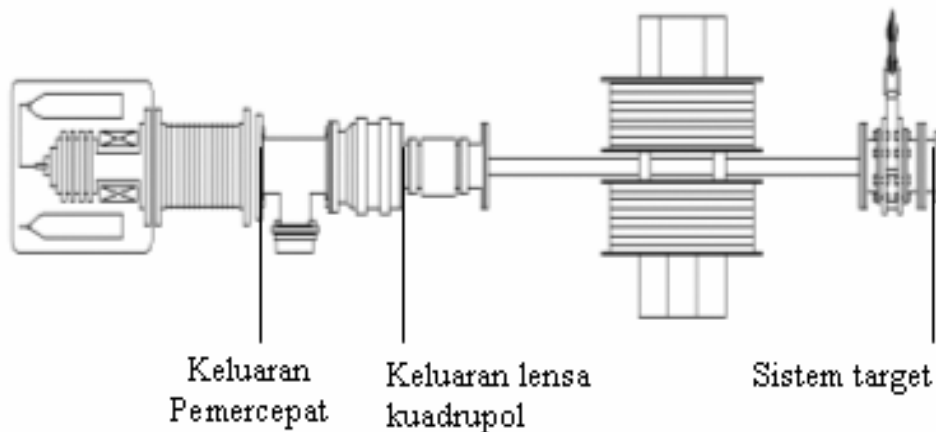
1. Pembuatan keping target dari bahan alumunium yang dibalut dengan jaring-jaring timah untuk terminal pengukuran arus berkas.
2. Keping target ini dikaitkan pada *flexy glass* yang selain berfungsi sebagai isolator juga berfungsi sebagai penutup vakum.

3. Ukuran keping target untuk keluaran sistem pemercepat berdiameter ± 9 cm untuk keluaran lensa kuadropol dan sistem target masing-masing berdiameter ± 5 cm.
4. Kertas kalkir yang digunakan sebagai media perekam data berkas ion dopan dijepitkan diantara keping target dan jaring timah.
5. Ion dopan yang dipergunakan masing-masing adalah TiN dan N

Gambar 1a dan 1b masing-masing menunjukkan keping target dan tempat pengambilan data berkas pada mesin implantasi ion.



Gambar 1a. Keping target.



Gambar 1b. Tempat pengambilan data berkas.

Pengolahan Citra Berkas Ion

Pengolahan citra berkas ion dilakukan dalam dua tahap, penyiapan data dan pemrograman scanning menggunakan Matlab untuk menghitung dosis ion dengan parameter luasan citra dan untuk mengetahui distribusi berkas ion dengan menganalisa hitogram citra yang dihasilkan. Penyiapan data dilakukan setelah didapatkan data citra hasil dari proses implantasi. Data citra berkas tersebut kemudian di-*scan* dan diolah dengan AdobePhotoshop® dalam dua tahap. Pertama, data di-*crop* sehingga tinggal menyisakan spot berkas ion yang terdistribusi pada kertas kalkir. Setelah spot berkas ion dapat dipisahkan, citra dari data tersebut dirubah ke dalam bentuk citra hitam putih dengan tingkat keabuan (*gray scale*) tertentu. Sebelumnya citra dalam bentuk warna RGB (*Red Green Blue*). Hal ini untuk memudahkan penghitungan luasan dan histogram citra dari spot berkas ion. Program Matlab yang dibuat membaca pixel demi pixel dengan cara *scanning* citra berkas pada arah sumbu x dan y, dengan algoritma sebagai berikut:

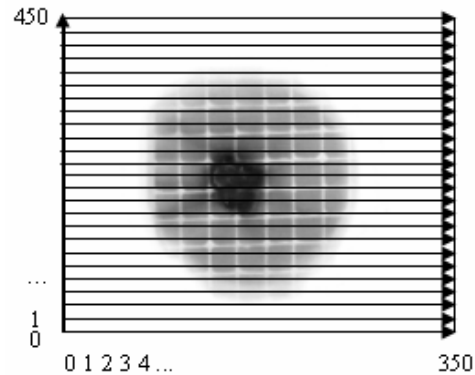
1. Menentukan koordinat sumbu dua dimensi x dan y.
2. Menentukan variabel tinggi yang lebih kecil daripada dua-kali rata-rata tinggi data citra berkas dan variabel lebar yang lebih kecil daripada dua-kali rata-rata lebar data citra berkas.
3. Melakukan *scanning* berjalan mulai dari (tinggi, lebar) = (0,0), (0,1)...(0,lebar) naik ke (1,0),(1,1)...(1,lebar) sampai dengan (tinggi,0), (tinggi,1)...(tinggi,lebar) untuk mendeteksi keberadaan citra.

proses scanning:

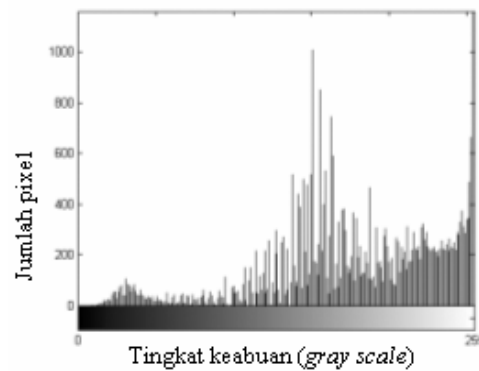
Di setiap koordinat pixel yang dilaluinya program akan memeriksa apakah pixel yang ada adalah putih atau selain putih, jika putih diberikan nilai 0 dan selain putih akan diberikan nilai 1. Nilai ini kemudian akan dijumlahkan ke dalam sebuah variabel sehingga di akhir program *scanning*, akan didapatkan berapa jumlah pixel selain putih yang ada pada citra dari kertas data. Jumlah dan distribusi pixel inilah yang merupakan luasan dari spot ion dan histogram citra.

4. Menghitung luasan citra dan menentukan histogram citra.

Sebagai contoh diambil citra berkas ion dari N yang berukuran 354x285 piksel, Gambar 2a dan 2b masing-masing menunjukkan proses scanning dan grafik histogram yang dihasilkan.



Gambar 2. Proses scanning.



Gambar 2b. Grafik histogram citra.

Pada citra berkas ion, loop program berjalan dari titik (0,0) sampai dengan (350,0) kemudian naik ke titik (0,1) berjalan ke kanan sampai titik (350,1). Demikian seterusnya sampai dengan titik (0,450) ke titik (350,450). Dalam loop diperiksa apakah pixel yang ada adalah putih atau selain putih, jika putih diberikan nilai 0 dan selain putih akan diberikan nilai 1, untuk kemudian dijumlahkan dan diperoleh total jumlah titik-titik yang bukan putih, dalam contoh di atas didapat jumlah pixel 38.405 pixel². Hasil *scanning* juga ditampilkan dalam bentuk grafik histogram. Grafik tersebut mengelompokkan warna-warna yang bukan

putih dengan skala keabuan antara 0-254 yang ditunjukkan sumbu x, dan dengan banyaknya pixel pada sumbu y ditunjukkan oleh tinggi garis di masing-masing skala keabuan. Semakin tinggi garis pada grafik yang terbentuk, semakin banyak pula pixel yang menumpuk pada skala keabuan tersebut. Luas berkas spot ion yang didapat adalah dalam bentuk satuan pixel^2 , sedang untuk menghitung dosis dari distribusi ion digunakan satuan cm^2 . Untuk itu perlu dikonversi dari pixel ke cm. Konversi dilakukan dengan AdobePhotoshop® dan didapatkan faktor konversi 1 pixel = 0,36 mm = 0,036 cm, sehingga 1 $\text{pixel}^2 = 0,001296 \text{ cm}^2$.

Perhitungan Dosis Ion

Dosis adalah jumlah atom dopan yang terimplantasi ke dalam substrat/keping target per satuan luas. Jumlah total atom dopan yang terimplantasi ditentukan oleh fluks ion dopan yang datang pada sistem target F_i (ion / $\text{cm}^2 \cdot \text{detik}$) dan lama waktu implantasi t_i , dan dapat dituliskan sebagai $D = F_i \times t_i$. Fluks ion dopan F_i dari muatan positif q per ionnya dimanifestasikan dalam bentuk arus berkas ion I yang langsung dapat diukur menggunakan amperemeter yang dipasang antara target dan ground, yang memenuhi persamaan

$$n q F_i = \frac{I}{A} \quad \text{atau} \quad F_i = \frac{I}{n q A} \quad (1)$$

Arus berkas ion berubah-ubah terhadap waktu (hal ini adalah kenyataan pada pengukuran arus berkas yang kemungkinan disebabkan oleh faktor dari proses ionisasi pada sumber ion dan transport berkas), sehingga integrator total muatan diperlukan untuk menghitung jumlah total ion yang dapat diimplantasikan pada target selama waktu t_i .

$$D = \frac{1}{n q A} \int_0^{t_i} I \cdot dt \quad (2)$$

Dengan asumsi arus berkas tetap selama proses implantasi maka dosis dapat dihitung sebagai

$$D = \frac{I \cdot t_i}{n q A} \quad (3)$$

Dengan mengacu pada persamaan (3) di atas, hanya tinggal satu parameter yang belum ada untuk menentukan dosis ion terimplantasi, yaitu luas permukaan target. Luas berkas didapat dari konversi jumlah pixel pada proses program *scanning* citra berkas.

Simulasi Menggunakan Software SRIM

Sebagai pembanding digunakan software *SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter)*, dengan data yang dapat dibandingkan hanya data pada keluaran sistem target. Catatan bahwa *SRIM* tidak menyediakan fasilitas waktu, sehingga sebagai padanan digunakan jumlah ion dopan yang akan diimplantasi. Dengan demikian untuk padanan 1.200 detik waktu implantasi, pada *SRIM* di-set jumlah ion sebanyak 120.000. Dari program *SRIM* kemudian dapat ditentukan spot ion yang dihasilkan serta didapatkan grafik histogram yang menentukan pola distribusi pada spot ion. Luasan distribusi spot ion kemudian dengan cara yang sama diestimasi menggunakan program Matlab dan untuk TiN diperoleh dosis sebesar $1,28686 \times 10^{21}$ ion dopan/ cm^2 untuk N diperoleh dosis sebesar $4,28605 \times 10^{20}$ ion dopan/ cm^2 .

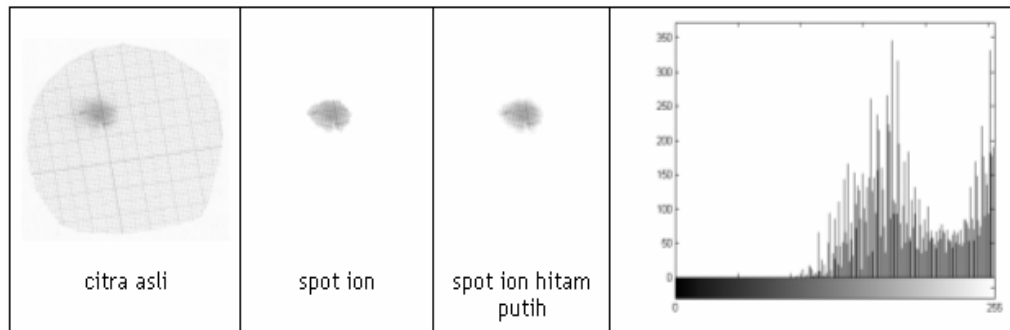
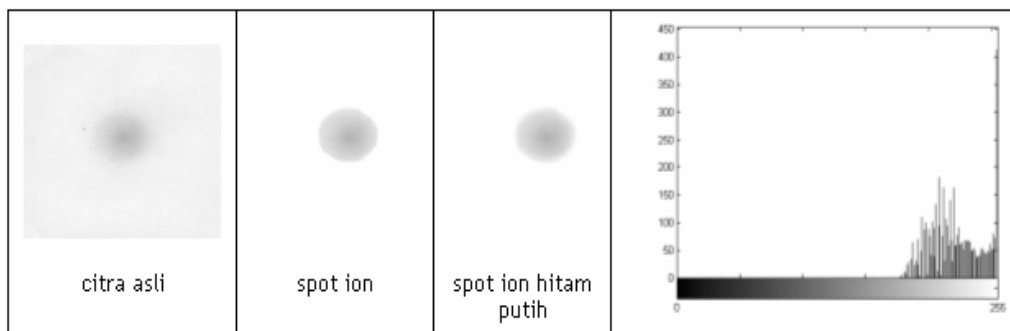
HASIL DAN PEMBAHASAN

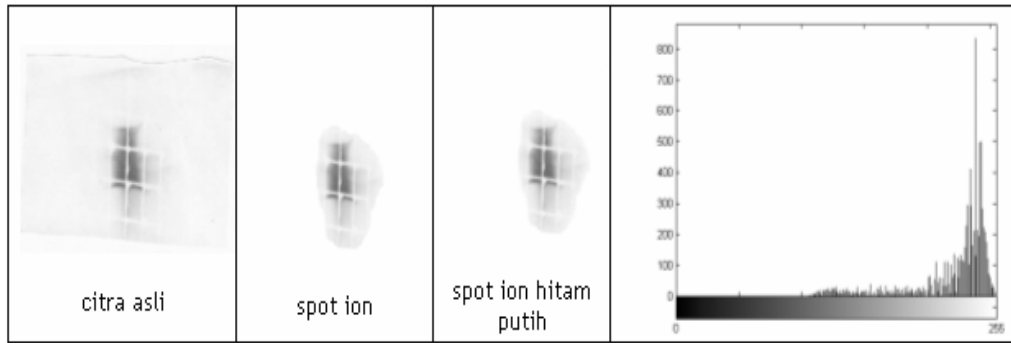
Pengukuran berkas ion dopan dilakukan pada keluaran sistem pemercepat, keluaran lensa kuadrupol dan sistem target. Ion dopan yang dipergunakan adalah TiN dan N, namun secara substansial hampir tidak berpengaruh pada keluaran citra berkas. Data pengukuran tegangan pemercepat dan tegangan tiap pasangan lempeng hiperbolik lensa kuadrupol untuk selama waktu proses implantasi 1.200 detik diberikan pada Tabel 1. Data keluaran citra berkas dan histogram citra berkas dari ion dopan, untuk menghemat ruang, ditampilkan hanya data TiN untuk masing-masing keluaran sistem pemercepat, keluaran lensa kuadrupol dan sistem target pada Gambar 3, 4 dan 5.

Besar arus berkas ion TiN dan N lebih kecil daripada besarnya pada keluaran sistem pemercepat dan lensa kuadrupol. Ini karena magnet pembelok tidak meneruskan pengotor ion.

Tabel 1. Data arus dan tegangan hasil pengukuran.

Ion Dopan	Bagian	I (μA)	t (dtk)	Vq1 (kV)	Vq2 (kV)	Ek (keV)
TiN (n = 4)	Keluaran sistem pemercepat	20	1200	-	-	20
	Keluaran lensa kuadropol	20	1200	10	10	20
	Keluaran sistem target	14	1200	10	10	20
N (n = 3)	Keluaran sistem pemercepat	20	1200	-	-	20
	Keluaran lensa kuadropol	20	1200	10	10	20
	Keluaran sistem target	10	1200	10	10	20

**Gambar 3. Citra TiN–Keluaran tabung pemercepat dan histogram citranya (Skala 1 : 4).****Gambar 4. Citra TiN–Keluaran lensa kuadropol dan histogram citranya (Skala 1 : 2).**



Gambar 5. Citra TiN–Keluaran sistem target dan histogram citranya (Skala 1 : 2).

Tabel 2. Perhitungan dosis implantasi.

Ion Dopan	Bagian	I (μA)	T (dtk)	A (cm^2)	D (ion dopan/ cm^2)
TiN (n = 4)	Keluaran sistem pemercepat	20	1200	17,057952	$15,9839 \times 10^{21}$
	Keluaran lensa kuadropol	20	1200	3,62232	$1,03525 \times 10^{21}$
	Keluaran sistem target	11	1200	11,827296	$1,58532 \times 10^{21}$
N (n = 3)	Keluaran sistem pemercepat	20	1200	52,739424	$9,48057 \times 10^{20}$
	Keluaran lensa kuadropol	20	1200	29,772882	$1,00456 \times 10^{20}$
	Keluaran sistem target	10	1200	19,533392	$5,25946 \times 10^{20}$

Catatan bahwa citra pada keluaran sistem pemercepat mempunyai perbandingan 1:4. Dibandingkan dengan citra keluaran lensa kuadropol, luas penampang berkas ionnya lebih lebar. Hal tersebut dimungkinkan karena efek pemfokusan pada lensa kuadropol. Akan tetapi pada sistem target terlihat bahwa distribusi ion kembali menyebar. Pada grafik histogram citra, ditempatinya bin-pixel di bagian kiri menyatakan bahwa citra berkas terang menyatakan bahwa tidak terlalu terjadi penumpukan berkas ion pada tempat-tempat yang sama. Bentuk grafik histogram tidak menyatakan murni gaussian, hal tersebut menyatakan penyebaran citra berkas ion. Bentuk sebaran histogram citra pada keluaran lensa kuadropol lebih gaussian dibanding dengan pada keluaran sistem target.

Perhitungan dosis implantasi ion dengan mengangap arus berkas diasumsikan stabil dan

menggunakan parameter luas citra berkas ion diberikan pada Tabel 2.

Dari data luasan berkas yang dihitung menggunakan data citra keluaran menyatakan bahwa fungsi lensa kuadropol sebagai pemfokus berkas bekerja baik. Hasil perhitungan dosis pada keluaran lensa kuadropol relatif menurun karena kemungkinan penumpukan ion pada tempat-tempat yang sama.

KESIMPULAN

Dari hasil dan pembahasan dapat dicatat dan disimpulkan beberapa hal penting sebagai berikut:

- Teknik pengolahan citra berkas ion dapat dipakai sebagai alternatif untuk mengukur profil beam, akan tetapi harus menggunakan

media perekam data yang lebih baik. Kertas kalkir yang digunakan sebagai media kurang baik karena adanya pergeseran panas yang membakar sisi yang seharusnya tidak terbakar dan bila ion-ion jatuh pada tempat yang sama tidak ter-record. Media yang baik untuk digunakan seharusnya adalah sistem kamera CCD^[7].

- Dari hasil verifikasi dengan simulasi menggunakan perangkat lunak SRIM, ketelitian metode yang dipakai terjadi kesalahan sekitar 15 – 20 persen. Verifikasi hanya dilakukan pada sistem target, yaitu dengan membandingkan dosis dari tiap-tiap implantasi ion dopan. Faktor kesalahan selain dari kemungkinan kesalahan pada media perekam data seperti tersebut di atas, juga karena penyebaran ion-ion dopan itu sendiri.
- Secara umum distribusi ion dopan pada mesin implantasi ion di P3TM-BATAN masih cukup baik, hanya bentuk berkas pada sistem target terjadi sedikit sebaran ion sehingga spot ion menjadi tidak simetri.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A.B. CAMEL, *Plasma Physics and Magnetofluidmechanics*, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1963.
- [2] A. GALEJS, P.H. ROSE, *Optics of Electrostatic Accelerator Tubes*, in *Focusing of Charged Particles*, vol II, Academic Press, London, 1967.
- [3] A. HOFFMAN, *Classical Electrodynamics*, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1998.
- [4] G.R. BREWER, *Focusing of High Density Electron Beams*, in *Focusing of Charged Particles*, vol II, Academic Press, London 1967.
- [5] AdobePhotoshop® software manual.
- [6] MICHAEL SEUL *et.al*, *Practical Algorithms for Image Analysis: Description, Examples and Code*, Cambridge University Press, 2001.
- [7] A. PETERS, P. FORCK, A. WEISS, A. BANK, *Transverse Beam Profile Meas-*

urements Using Optical Methods, DIPAC Proceeding, Germany, 2001.

TANYA JAWAB

Tjito Sujitno

- Hasil ini merupakan pengukuran secara kualitatif. Bagaimana agar dapat diperoleh data yang kuantitatif.

Slamet Santosa

- Dosis implantasi dapat dihitung dengan menghitung parameter luas berkas, namun dengan media rekam kertas kalkir tidak akurat. Agar dapat diperoleh data presisi baik kuantitatif dan kualitatif perlu digunakan CCD kamera.

Suprpto

- Dalam proses pengamatan, apakah tidak mengganggu operasi implantor ion karena akan terjadi pemanasan dan penguapan target (kertas kalkir).

Slamet Santosa

- Tidak mengganggu proses implanisasi selanjutnya karena dapat dibersihkan, divakum dan dialirkan gas nitrogen.

Djoko SP

- Dari hasil pengukuran distribusi berkas ion yang anda lakukan, apa tindak lanjut atau usaha yang harus dilakukan untuk memperbaiki distribusi berkas ion sehingga hasil implantasi ion menjadi lebih akurat?

Slamet Santosa

- Dari pengukuran yang kami lakukan, saat ini penyimpangan berkas tidak terlalu lebar sehingga masih dapat dilakukan regulasi melalui tegangan pada lensa kuadrupol. Untuk masa umur mesin yang akan datang mungkin perlu dipikirkan modifikasi baik sistem pemercepat maupun lensa kuadrupol, termasuk kebersihannya.