

EFEK PENAMBAHAN DOSIS ION Ar⁺ TERHADAP PROSES PENUMBUHAN CARBON NANOTUBE DARI NANOKOMPOSIT Fe-C

Yunasfi

Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN) - BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong 15314, Tangerang

e-mail: yunasfi@gmail.com

ABSTRAK

EFEK PENAMBAHAN DOSIS ION Ar⁺ TERHADAP PROSES PENUMBUHAN CARBON NANOTUBE DARI NANOKOMPOSIT Fe-C. Telah dilakukan penelitian efek dosis ion Ar⁺ terhadap proses penumbuhan *Carbon Nanotube (CNT)* dari nanokomposit Fe-C dengan teknik implantasi ion. Kompaksi Fe-C sebagai target pembuatan lapisan tipis nanokomposit Fe-C tersusun atas serbuk nanokomposit Fe-C, yang dipersiapkan melalui proses *milling* dengan teknik *High Energy Milling (HEM)* selama 50 jam. Morfologi serbuk Fe-C hasil *milling* diamati dengan *Scanning Electron Microscope (SEM)* guna mengetahui ukuran partikel serbuk. Selanjutnya, serbuk Fe-C hasil *milling* dikompaksi untuk menjadi target *DC-Sputtering*. Lapisan tipis Fe-C/Si yang terbentuk diimplant ion Ar⁺ dengan gas Argon sebagai sumber ion pada dosis 5×10^{15} ion/cm² hingga 1×10^{17} ion/cm². Selanjutnya, lapisan tipis Fe-C diidentifikasi fasanya dengan *XRD*, dan diamati penampang lintangnya dengan *SEM*. Hasil *XRD* setelah *implant* menunjukkan puncak intensitas difraksi turun seiring dengan peningkatan dosis ion Ar⁺. Hasil *SEM* menunjukkan ukuran partikel serbuk Fe-C dalam skala nano. Selain itu hasil *SEM* juga memperlihatkan permukaan lapisan tipis tidak rata, ketidakrataan ini semakin jelas seiring dengan naiknya dosis, serta ditunjukkan pembentukan *CNT* di permukaan lapisan tipis Fe-C.

Kata kunci: Nanokomposit Fe-C, Implantasi Ion, *CNT*, Lapisan Tipis Fe-C, Dosis

ABSTRACT

EFFECT OF INCREASING Ar⁺ ION DOSAGE ON THE GROWTH PROCESS OF CARBON NANOTUBES FROM NANOCOMPOSITE Fe-C. A study on the effect of Ar⁺ ion dose in the growth process of Carbon Nanotubes (CNT) of nanocomposite Fe-C with ion implantation technique has been carried out. Compaction of Fe-C as a target in producing nanocomposite Fe-C thin film was composed of nanocomposite Fe-C powder, which is prepared through milling process by High Energy Milling (HEM) technique for 50 hours. The morphology of milled Fe-C powder was observed by SEM to determine the particle size. Furthermore, the milled Fe-C powder was compacted to be used as target for DC-Sputtering technique. Formed Fe-C thin film then was implanted by Ar⁺ ion with argon gas as an ion source at the doses between 5×10^{15} to 1×10^{17} ions/cm². Next, the phase of Fe-C thin film was identified by XRD, and the cross section was observed by SEM. The result of XRD after implantation showed the reduction of diffraction peak intensity with the increasing of Ar⁺ ion dose. The result of SEM showed that particle of Fe-C powder was in nano order size. From SEM also showed the uneven surface, this unevenness became clearly with the increasing of dose, and the formation of CNTs on the surface of thin film was also exhibited.

Key words : Nanocomposite Fe-C, Ion Implantation, CNT, Fe-C Thin Film, Dose

PENDAHULUAN

Nanoteknologi merupakan suatu bidang baru dalam sains dan teknologi yang tumbuh dengan cepat. Nanoteknologi ini muncul dari pengembangan elektronika, fisika, kimia, biologi dan ilmu bahan untuk menciptakan fungsi-fungsi baru pada bahan dalam dimensi skala nanometer.

Pada teknologi manufaktur, nanoteknologi diprediksi memiliki dampak utama pada 20 tahun hingga 30 tahun mendatang [1].

Salah satu bentuk nanoteknologi dalam ilmu bahan adalah pengembangan nanokomposit yang merupakan bahan yang dibuat dari pencampuran

serbuk berukuran nanopartikel. Nanokomposit akan memperlihatkan sifat-sifat baru yang lebih unggul dibandingkan dengan bahan asal penyusunnya. Penambahan nanopartikel ke dalam bahan matriks juga akan dapat menunjukkan sifat-sifat yang sangat berbeda dibandingkan dengan sifat matriks awal. Sebagai contoh, dengan menambahkan karbon berstruktur nano pada suatu bahan, maka nilai konduktivitas termal dari bahan tersebut akan meningkat. Secara umum, nanopartikel akan terdispersikan ke dalam matriks selama proses pencampuran. Persentase berat (*mass fraction*) dari nanopartikel yang disisipkan sangat kecil (sekitar 0,5% - 5%), karena sangat besarnya rasio luas permukaan (*s.a./vol.*) dari nanopartikel. Banyak penelitian dilakukan untuk mengembangkan kombinasi bahan matriks dan bahan pencampur (*additif*) yang lebih efisien guna menuju pengendalian proses pencampuran yang lebih baik [2]. Diantaranya adalah sistem bahan yang berbasis besi-karbon (Fe-C).

Fe-C merupakan sistem yang menarik karena memiliki sifat kelistrikan dan kemagnetan yang sangat baik serta berpotensi diaplikasikan sebagai bahan sensor, kapasitor penyimpan energi, katalis dan lain sebagainya [3-6]. Nanokomposit dan nanostruktur karbon yang mengandung nanopartikel besi menunjukkan sifat kedua unsur, yaitu kelistrikan dan kemagnetan, dimana telah terbukti bahwa bahan komposit ini menjadi bahan yang berguna untuk aplikasi elektromagnetik dalam bentuk lapisan tipis [7,8].

Di sisi lain, sifat kelistrikan tabung nano karbon (*Carbon Nanotube, CNT*) juga sangat menarik, yaitu sebagai molekul elektronik yang menawarkan potensi signifikan sebagai teknologi alternatif berprospek cerah untuk perangkat berbasis silikon [9-14]. Konduktivitas *CNT* menunjukkan nilai yang tinggi dan stabilitas yang besar, yang menjanjikan untuk aplikasi ke nano elektronik dan piranti sensor. Sebagai contoh, telah ada piranti sensor yang dikembangkan dari bahan AlSi yang mengandung sejumlah tabung nano dengan perbedaan jenis bahan dan diameternya. Faktor perbedaan ini dimanfaatkan untuk mempengaruhi sifat kelistrikan, sehingga dapat dipakai untuk penginderaan kimia [15]. Seiring dengan prospek aplikasi untuk nano-elektronik di masa depan, penumbuhan *CNT* telah menjadi suatu tantangan besar bagi para peneliti.

Telah dilaporkan bahwa *CNT* dapat dibuat melalui pembentukan cacat secara sengaja menggunakan *Focused Ion Beam (FIB)*, yang secara signifikan dapat mempengaruhi transportasi atom/molekul, kelistrikan dan perilaku transistor [16]. Kemampuan membentuk cacat secara sengaja seperti ini banyak dilakukan oleh para peneliti melalui berbagai metoda dalam rangka untuk menumbuhkan *CNT*. Pembentukan cacat dapat juga dilakukan dengan memberikan bahan tambahan (*additif*) untuk memperkenalkan tegangan (*strain*) lokal untuk mempengaruhi kemunculan/penumbuhan *CNT*, atau

dapat juga dengan memakai partikel sebagai katalis penumbuh.

Dalam penelitian ini, dilakukan upaya pembentukan cacat dengan menggunakan teknik implantasi ion Argon (Ar^+) pada lapisan tipis Fe-C, sebagai langkah awal untuk eksplorasi cara penumbuhan *CNT*.

METODE PERCOBAAN

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah serbuk grafit (*Carbon, C*) yang diperoleh dari *Merck* dengan tingkat kemurnian 99,5% dan ukuran partikel 10 μm , serta serbuk besi (Fe) produk *Aldrich* dengan tingkat kemurnian 99,9% dan ukuran partikel 10 μm hingga 50 μm .

Alat

Peralatan untuk menyiapkan nanopartikel Fe-C adalah peralatan *milling* jenis *High Energy Milling (HEM)* merek *SPEX CertiPrep 8000M Mixer/Mill* yang terpasang di Bidang Karakterisasi dan Analisis Nuklir (BKAN), PTBIN-BATAN. Untuk melakukan kompaksi terhadap serbuk Fe-C digunakan mesin pres tipe hidrolik merek *Daiwa Universal Testing Machine* : rat 100, kapasitas 100 ton, AC : 20 V, produksi *Daiwa Kenko Co. Ltd.*, yang terpasang di Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, ITB-Bandung. Untuk pembuatan lapisan tipis digunakan peralatan *DC-Magnetron Sputtering* yang terpasang di Fakultas MIPA Jurusan Fisika, ITB-Bandung. Selanjutnya untuk karakterisasi fasa-fasa digunakan peralatan Difraktometer Sinar-X merek *Phillips APD 3520* yang terpasang di Bidang Karakterisasi dan Analisis Nuklir (BKAN), PTBIN-BATAN. Untuk pengamatan morfologi permukaan serbuk dan lapisan tipis serta morfologi penampang lintang lapisan tipis digunakan peralatan *Scanning Electron Microscope (SEM)* merek *JEOL* yang dilengkapi dengan fasilitas *Energy Dispersion Spectrometer (EDS)* di Bidang Bahan Industri Nuklir (BBIN), PTBIN-BATAN.

Cara Kerja

Serbuk grafit dan serbuk besi masing-masing ditimbang sebanyak 10 gram, kemudian dimasukkan ke dalam wadah vial besar berukuran 50 mL yang terbuat dari bahan *stainless steel*. Selanjutnya campuran serbuk tersebut di *milling* selama 50 jam pada suhu ruang (R.T.). Perbandingan berat bola : berat cuplikan adalah 3 : 2. Untuk menghindari kerusakan pada alat *milling* akibat peningkatan suhu motor yang terlalu tinggi, maka untuk setiap siklus *milling* selama 90 menit, proses dihentikan sekitar 30 menit untuk tujuan pendinginan motor. Dalam proses *milling* ini *vial* serta bola yang digunakan terbuat dari bahan *stainless steel*.

Campuran serbuk grafit dan besi hasil *milling* diamati morfologi permukaannya dengan metoda *SEM*, untuk mengetahui ukuran serbuk komposit Fe-C yang terbentuk akibat proses *milling*. Selanjutnya campuran serbuk ini ditimbang sebanyak 8 gram untuk dikompaksi dengan daya tekan 5 ton. Ketika tekanan mesin pres mencapai 5 ton, penekanan ditahan selama 5 menit untuk menyempurnakan proses kompaksi sehingga pelet yang terbentuk kuat dan tidak mudah pecah. Pelet yang dibuat berdiameter 25 mm dan ketebalan 50 mm.

Pelet Fe-C yang terbentuk, selanjutnya digunakan sebagai target dalam pembuatan lapisan tipis Fe-C dengan metode *DC-Sputtering*, sedangkan sebagai substrat digunakan Si(100). Parameter *sputtering* adalah suhu substrat 300 °C dengan waktu deposisi = 180 menit, kuat arus = 0,033 A, tegangan = 600 V, dan tekanan vakum = $3,3 \times 10^{-2}$ Torr.

Tahap selanjutnya dilakukan implantasi ion Argon terhadap lapisan tipis Fe-C/Si. Parameter saat proses implantasi ion adalah energi *doping* (E) = 70 keV, arus = (I) 20 mA, tingkat vakum = 10^{-5} mbar, muatan elektron Ar = (e) $1,603 \times 10^{-19}$, dan luas penampang sumber ion (L) = 12,566 cm². Untuk menghitung dosis ion implantasi dengan memasukkan parameter tersebut ke dalam Persamaan (1) sebagai berikut :

$$D = \frac{I(A) \times t(dt)}{e \times L} \dots\dots\dots (1)$$

Dengan memasukkan waktu *doping* (t) antara ± 8,5 menit hingga ± 2,8 jam, maka diperoleh dosis implantasi (D) antara 5×10^{15} ion/cm² sampai 1×10^{17} ion/cm².

Lapisan tipis nanokomposit Fe-C hasil implan dilakukan identifikasi fasa dengan metode *XRD* dan selanjutnya dilakukan kembali pengamatan morfologi permukaan dan penampangnya dengan metode *SEM*, untuk mengamati pembentukan *CNT* pada permukaan lapisan tipis Fe-C/Si.

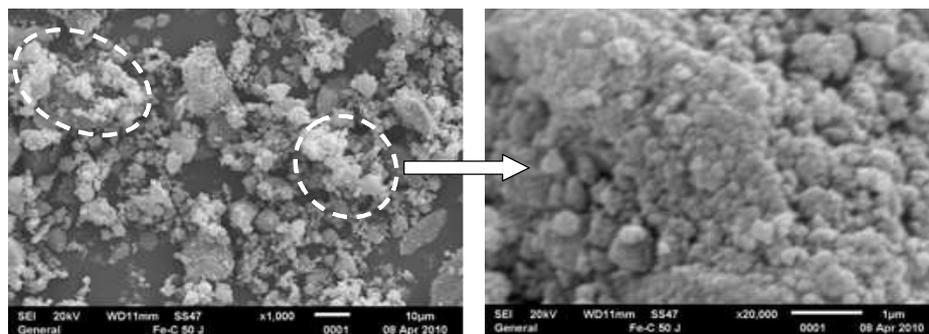
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengamatan morfologi permukaan serbuk Fe-C setelah diproses *milling* dengan teknik *HEM* selama

50 jam ditunjukkan pada Gambar 1. Pengamatan morfologi permukaan ini bertujuan untuk mengetahui ukuran partikel serbuk setelah dihancurkan dengan proses *milling*. Diharapkan bahwa setelah proses *milling* selama 50 jam, serbuk Fe-C memiliki partikel berukuran nano, sehingga dapat meningkatkan kualitas penumbuhan lapisan tipis Fe-C di atas substrat Si(100) pada saat serbuk nano order tersebut digunakan sebagai target pada proses *sputtering*. Seperti diperlihatkan pada Gambar 1, terlihat bahwa serbuk Fe-C telah mengalami penghancuran yang disebabkan oleh tumbukan antara serbuk Fe-C dengan bola-bola *milling*, dan beberapa bagian serbuk mengelompok membentuk gumpalan (lihat Gambar 1 foto sebelah kiri yang diberi tanda lingkaran). Bila dilihat dari hasil *SEM* pembesaran 10.000 kali (Gambar 1 kanan), terlihat bahwa rentang ukuran serbuk Fe-C adalah berkisar 100 nm hingga 200 nm. Serbuk memiliki tendensi untuk mengelompok dan menggumpal, dimana gumpalan yang terbentuk tersusun atas serbuk-serbuk berukuran lebih kecil (atau disebut dengan istilah fragmen-fragmen), dan beberapa fragmen melebur dengan fragmen lainnya dalam arah yang berlawanan.

Secara teori dikatakan bahwa pada proses *miling mechanical alloy* terjadi saling bertumbukan antara bola-bola *miling* dengan serbuk sehingga serbuk tersebut hancur dan pecah menjadi fragmen-fragmen, dan kemudian mengarah ke terjadinya penggabungan (*cold welding/cold pooling*). Mekanisme tahapan pada proses *mechanical alloy* secara umumnya tersusun atas 4 (empat) tahapan. Pertama adalah proses perataan yang diikuti oleh proses penggabungan, kedua adalah pembentukan serbuk dengan arah yang sama, ketiga adalah penyatuan orientasi acak, dan keempat adalah terbentuknya keadaan yang stabil (*steady state*) [18].

Dari Gambar 1 terlihat bahwa telah terbentuk fragmen serbuk dalam arah yang berlawanan, dimana serbuk tersebut memiliki ukuran kecil sampai ke skala nano, sehingga dari hasil ini dapat dikatakan bahwa proses penggilingan dan penghancuran serbuk menggunakan teknik *HEM* selama 50 jam pada penelitian kali ini telah melewati ke-4 tahapan pada proses *mechanical alloy*. Serbuk nanokomposit Fe-C hasil proses *miling* ini memiliki ukuran sekitar 150 nm.



Gambar 1. Pengamatan morfologi permukaan serbuk nanokomposit Fe-C dengan *SEM* setelah proses *milling* dengan teknik *HEM*. (a) Pembesaran 1000x dan (b) Pembesaran 10000x

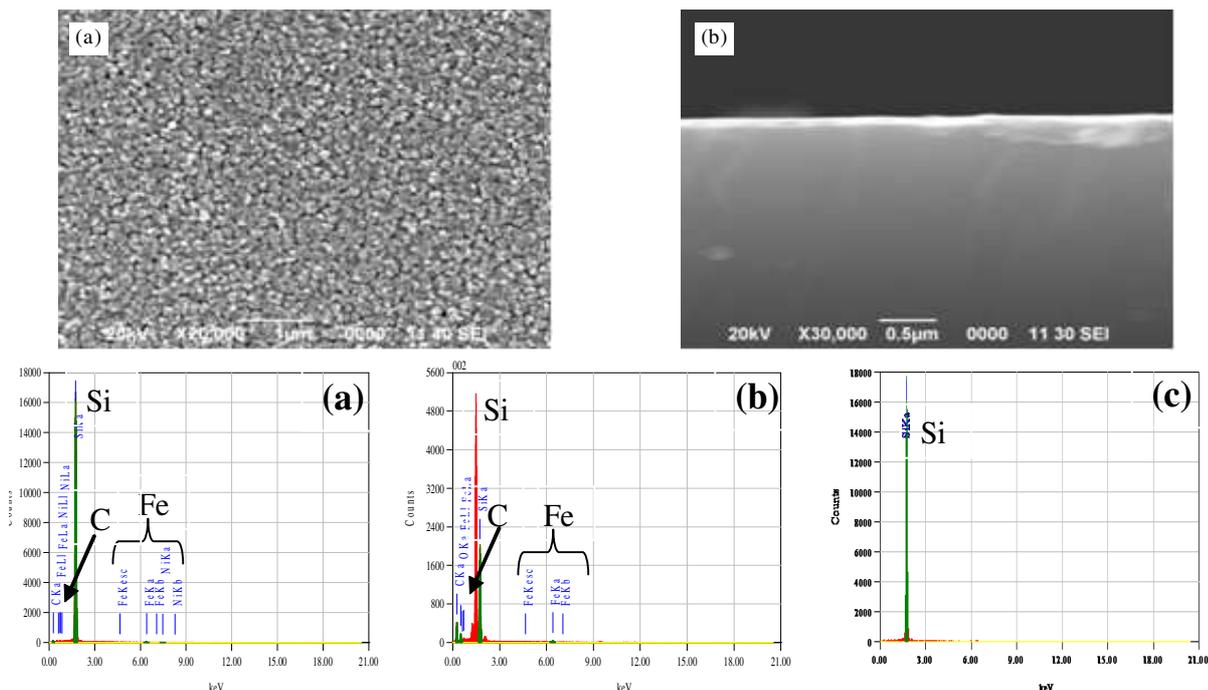
Selanjutnya, serbuk nanokomposit Fe-C hasil milling diproses kompaksi untuk dijadikan pelet, dan berikutnya pelet bentukan ini digunakan sebagai target untuk penumbuhan lapisan tipis Fe-C di atas permukaan substrat Si(100) dalam proses *sputtering*. Untuk mengetahui tingkat homogenitas lapisan tipis yang terbentuk, dilakukan observasi dengan metode *SEM*. Tingkat homogenitas lapisan tipis berperan sangat penting, terutama dalam kaitannya dengan usaha penumbuhan *CNT* pada permukaan lapisan tipis, dan juga untuk menghasilkan bahan fungsional dengan karakteristik magnetik dan listrik yang unggul.

Pada Gambar 2 menunjukkan morfologi permukaan dan morfologi penampang lintang lapisan tipis Fe-C, terlihat bahwa lapisan tipis ini memiliki morfologi permukaan yang bagus dan merata, juga tampak jelas bahwa partikel Fe-C telah terdeposisikan cukup merata di atas permukaan substrat Si (100), yang ditandai dengan adanya bulatan putih yang merata di permukaan substrat Si (100) (Gambar 2(a)). Terbentuknya lapisan tipis Fe-C pada permukaan Si(100) juga didukung oleh hasil *EDS* terhadap permukaan, yang memunculkan puncak-puncak difraksi elemen Fe dan C. Selanjutnya, dari foto *SEM* penampang lintang lapisan tipis Fe-C, ditunjukkan adanya lapisan berwarna putih di bagian atas pada Gambar 2(b), yang berdasarkan hasil *EDS* diketahui bahwa lapisan ini adalah lapisan tipis Fe-C. Sedangkan di bawah lapisan berwarna putih nampak terlihat lapisan berwarna keabu-abuan, dimana dari hasil *EDS* diketahui bahwa lapisan ini adalah substrat Si(100). Dari hasil observasi *SEM* terhadap permukaan dan penampang lintang lapisan tipis dapat dikatakan bahwa

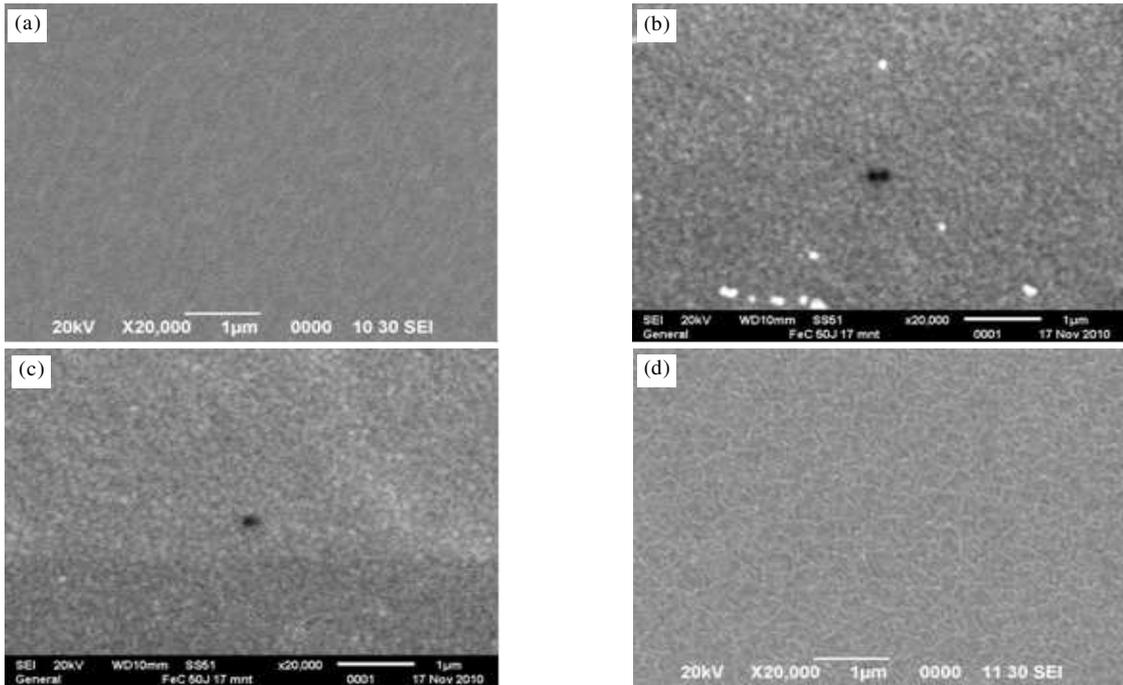
secara keseluruhan di atas substrat Si(100) telah terdeposisikan partikel Fe-C dan telah terbentuk lapisan tipis Fe-C (selanjutnya ditulis dengan Fe-C/Si) pada proses *sputtering* kali ini. Ketebalan lapisan tipis Fe-C/Si sekitar 100 nm.

Selanjutnya, terhadap lapisan tipis Fe-C/Si dilakukan proses implantasi dengan ion Ar⁺ pada variasi dosis antara antara 5 x 10¹⁵ ion/cm² hingga 1 x 10¹⁷ ion/cm². Hasil pengamatan *SEM* terhadap morfologi permukaan lapisan tipis Fe-C/Si setelah diimplan diperlihatkan pada Gambar 3. Dari foto *SEM* ini terlihat bahwa di semua permukaan masih memiliki morfologi yang merata dan halus, secara makro tidak ditemukan kerusakan di permukaan lapisan tipis akibat dari implantasi. Untuk mengetahui lebih rinci ada atau tidaknya kerusakan secara mikro, selanjutnya dilakukan pengamatan *SEM* terhadap penampang lintang masing-masing lapisan tipis Fe-C/Si yang telah diimplan. Selain itu juga untuk mengetahui dampak dosis implantasi ion terhadap ketebalan lapisan tipis Fe-C/Si.

Foto *SEM* terhadap penampang lintang lapisan tipis Fe-C/Si hasil implan ditunjukkan pada Gambar 4. Pada foto ini terlihat adanya lapisan terang berwarna putih di bagian atas, dimana nampak jelas bahwa lapisan ini tidak rata dan bergelombang. Ketidakrataan dan lebar bentuk gelombang ini semakin besar seiring dengan bertambahnya dosis implan ion Ar⁺ yang diberikan ke lapisan tipis Fe-C/Si. Dari permukaan yang tidak rata dan bergelombang ini diperkirakan akan tumbuh dan muncul *CNT*, namun untuk memastikannya perlu pengamatan permukaan secara mikro menggunakan peralatan observasi *Atomic Force Microscopy (AFM)*. Makalah



Gambar 2. Morfologi permukaan dan penampang lintang lapisan tipis nanokomposit Fe-C dan data *EDS*. (a). Morfologi permukaan lapisan tipis Fe-C dan (b). Penampang lintang lapisan tipis Fe-C.

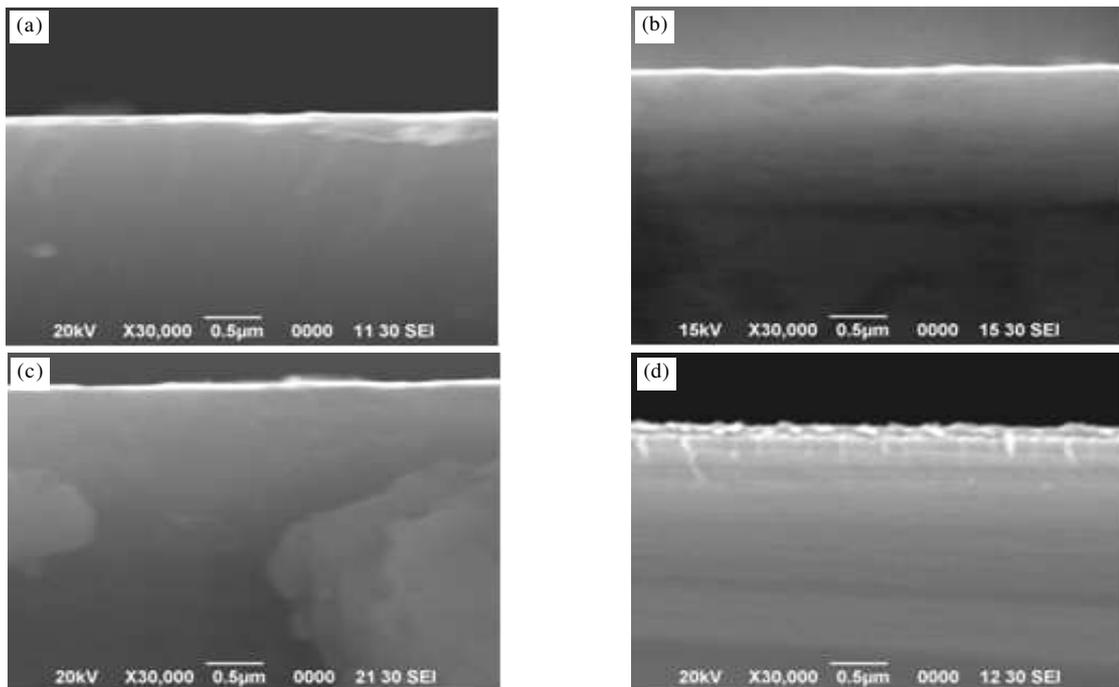


Gambar 3. Morfologi permukaan lapisan tipis nanokomposit Fe-C setelah diimplan dengan ion Ar pada variasi dosis. (a) Dosis 5×10^{15} n/cm², (b) Dosis 1×10^{16} n/cm², (c) Dosis 5×10^{16} n/cm² dan (d) Dosis 1×10^{17} n/cm²

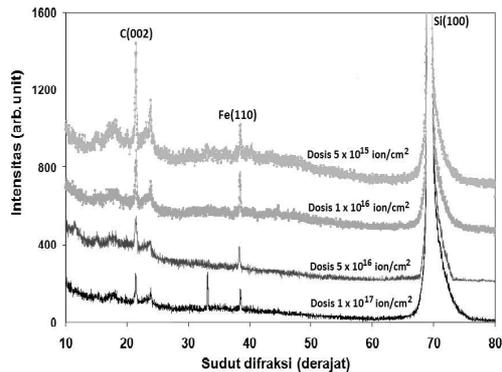
ilmiah kali ini, belum dijelaskan hasil pengamatan menggunakan *AFM*.

Untuk klarifikasi fasa pada lapisan tipis Fe-C/Si setelah proses implantasi dilakukan identifikasi fasa menggunakan *XRD*, yang hasilnya diperlihatkan pada Gambar 5. Terlihat bahwa puncak difraksi yang muncul adalah puncak C(002) dan Fe(110), dan puncak-puncak ini semakin berkurang seiring dengan bertambahnya

dosis implan. Penurunan puncak difraksi C(002) sangat signifikan sedangkan untuk Fe(110) menunjukkan penurunan yang tidak begitu signifikan. Selain itu, sudut puncak difraksi semakin bergeser ke kanan seiring dengan bertambahnya dosis implan. Hal ini disebabkan oleh interaksi antara radiasi ion dengan partikel-partikel komposit Fe-C. Analisis puncak-puncak difraksi dan penurunan puncak difraksi serta pergeseran sudut difraksi



Gambar 4. Penampang lintang lapisan tipis nanokomposit Fe-C setelah diimplan dengan ion Ar pada variasi dosis. (a) Dosis 5×10^{15} n/cm², (b) Dosis 1×10^{16} n/cm², (c) Dosis 5×10^{16} n/cm², (d) Dosis 1×10^{17} n/cm²



Gambar 5. Pola difraksi sinar-X lapisan tipis nanokomposit Fe-C setelah diimplan dengan ion Ar pada variasi dosis.

oleh iradiasi ion akan dilakukan pembahasan lebih lanjut pada makalah berikut.

Dari semua hasil dan pembahasan di atas, maka dapat diprediksi bahwa proses bakal tumbuhnya CNT di permukaan lapisan tipis Fe-C/Si dengan teknik implantasi ion Ar⁺ dapat terjadi sebagai akibat interaksi tumbukan ion Ar⁺ dengan partikel-partikel Fe-C yang ada di permukaan substrat Si(100). Akibat interaksi tumbukan ini dapat menimbulkan kerusakan atau cacat secara disengaja di dalam struktur kristalnya. Kerusakan atau cacat yang terbentuk ini selanjutnya akan menjadi fasilitator di dalam pemunculan dan penumbuhan CNT. Penumbuhan CNT terjadi pada lapisan tipis yang mengandung unsur karbon dengan memanfaatkan partikel Fe sebagai katalis penumbuh. Hasil ini sama dengan yang telah dilaporkan oleh beberapa peneliti menggunakan teknik penumbuhan yang berbeda, dimana selanjutnya lapisan yang telah ditumbuhi CNT akan terus tumbuh dan berubah menjadi jejaring CNT melalui nukleasi kerusakan atau cacat yang ada [19]. Secara umum partikel Fe akan menutupi lapisan karbon dalam proses kestabilan pembentukan dan penumbuhan CNT.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat diperoleh kesimpulan bahwa proses penghancuran serbuk Fe-C dengan teknik HEM selama 50 jam telah melewati semua tahapan pada proses *mechanical alloy*, dan dihasilkan serbuk nano komposit Fe-C berukuran sekitar 150 nm.

Melalui proses *sputtering* telah terdeposisikan dengan baik partikel Fe-C dan telah terbentuk lapisan tipis Fe-C di atas substrat Si, dimana lapisan tipis Fe-C/Si ini memiliki morfologi halus dan merata, dan dengan ketebalan berkisar 100 nm hingga 150 nm.

Implantasi ion Ar⁺ terhadap sampel lapisan tipis Fe-C/Si menimbulkan permukaan lapisan tipis yang tidak rata dan bergelombang. Ketidokrataan dan lebar bentuk gelombang ini semakin besar seiring dengan

bertambahnya dosis implan ion Ar⁺ yang diberikan ke lapisan tipis Fe-C/Si.

Dari permukaan yang tidak rata dan bergelombang ini diperkirakan akan tumbuh dan muncul CNT, namun untuk memastikannya perlu pengamatan permukaan menggunakan peralatan *Atomic Force Microscopy (AFM)*

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya kami sampaikan kepada Bapak Salim Mustofa yang telah membantu memberikan masukan di dalam penyelesaian makalah ini, kepada Ibu Tria Madesa yang telah membantu kami dalam preparasi sampel, kepada Bapak Yosef Sarwanto yang telah membantu kami dalam melakukan karakterisasi dengan metode XRD dan kepada Ibu Deswita yang telah membantu kami dalam melakukan karakterisasi dengan peralatan HR-SEM, juga kepada Bapak Ruswanto dari Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan ITB yang telah membantu kami dalam pembuatan sampel pelet, dan Bapak Ramli, mahasiswa S-3 Jurusan Fisika FMIPA-ITB yang telah membantu kami dalam pembuatan lapisan tipis Fe-C/Si. Ucapan terima kasih kepada Bapak Setyo Purwanto selaku Kepala Bidang Karakterisasi dan Analisis Nuklir (PTBIN)-BATAN yang telah memberikan kesempatan dan kepercayaan kepada kami dalam melaksanakan penelitian ini menggunakan dana DIPA tahun anggaran 2010.

DAFTAR ACUAN

- [1]. J.H.J. SCOTT and S.A. MAJETICH, *Phys. Rev. B*, **52** (1995) 12564
- [2]. P. TARTAJ, M.P. MORALES, S. VEINTEMILLAS-VERDAGUER, T.GONZALEZ-CARRENO and C.J. SERNA, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **36** R (2003) 182
- [3]. X.Q. ZHAO, Y. LIANG, Z.Q. HU and B.X. LIU, *J. Appl. Phys.*, **80** (1996) 5857
- [4]. C.A. GRIME, J.L. HORN, G.G. BUSH, J.L. ALLEN and P.C. EKLUND, *IEEE Trans. Magn.*, **33** (1997) 3736
- [5]. C.A. GRIMES, D. QIAN, E.C. DICKEY, J.L. ALLEN and P.C. EKLUND, *J Appl. Phys.*, **87** (2000) 5642
- [6]. F.S. DENES, S. MANOLACHE, Y.C. MA, V. SHAMAMIAN, B. RAVEL and S. PROKES, *J. Appl. Phys.*, **94** (2003) 3498
- [7]. J.L. WILSON, P. PODDAR, N.A. FREY, H. SRIHANT, K. MOHOMED, J.P. HARMON, S. KOTHA and J. WACHSMUTH, *J. Appl. Phys.*, **95** (2004) 1439
- [8]. H.M. KIM, K. KIM, C.Y. LEE, J. JOO, S.J. CHO, H.S. YOON, D.A. PEJAKOVIC, J.W. YOO and A.J. EPSTEIN, *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 589
- [9]. R. MARTEL, T. SCHMIDT, H.R. SHEA, T. HERTEL and P. AVOURIS, *Appl. Phys. Lett.*, **73** (1998) 2447

- [10]. S.J. TRANS, A.R.M. VERSHUEREN and C. DEKKER, *Nature*, **393** (1998) 49
- [11]. A. JAVEY, J. GUO, Q. WANG, M. LUNDSTROM and H. DAI, *Nature*, **424** (2003) 654
- [12]. H.W.C. POSTMA, T. TEEPEN, Z. YAO, M. GRIFONI and C. DEKKER, *Science*, **293** (2001) 76
- [13]. Z. YAO, H.W.C. POSTMA, L. BALENTS and C. DEKKER, *Nature*, **402** (1999) 273
- [14]. R.H. BAUGHMAN, A.A. ZAKHIDOV and W.A. DE HEER, *Science*, **297** (2002) 787
- [15]. P. AVOURIS, J. APPENZELLER, R. MARTEL and SHALOM J. WIND, Carbon Nanotube Electronics, *Proc. Of the IEEE*, **91** (11) (2003) 1772-1783
- [16]. M. LOYA, J.E. PARK, L.H. CHEN, K.S. BRAMMER, P.R. BANDARU and S. JIN, *NANO: Brief Report and Reviews*, **3** (2008) 49-454
- [17]. SALIM MUSTOFA and YUNASFI, *Indonesian Journal of Materials Science*, **10** (3) (2009) 288-291
- [18]. J.R. HARRIS, Mathematical Modelling of Mechanical Alloying, *Thesis Submitted to The University of Nottingham for The Degree of Doctor of Philosophy*, (2006)
- [19]. A. G. NASIBULIN, P. V. PIKHITSA, P. QUEIPO, M. CHOI and E. I. KAUPPINEN, *Phys. Stat. Sol. B*, **243** (13) (2006) 3095-3100