



PROSIDING NASIONAL

ISSN : 1411 - 4771



SIMPOSIUM FISIKA NASIONAL XXVII (SFN 2014)

"Fisika Dalam Kehidupan Sehari - hari"



UNIVERSITAS UDAYANA

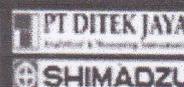
Bali - Indonesia, 16 - 17 Oktober 2014

Organized by:



Sponsored by :

Supported by :



SIMPOSIUM FISIKA NASIONAL 2014 (SFN XXVII), 16-17 Oktober 2014, Denpasar-Bali

ISSN : 1411-4771

Diterbitkan : 19 Maret 2015

**PROSIDING  
SIMPOSIUM FISIKA NASIONAL XXVII  
HIMPUNAN FISIKA INDONESIA**

16-17 Oktober 2014  
Universitas Udayana  
Denpasar Bali

**Tim Editor :**  
Dr. Wayan Gede Suharta  
Ni Nyoman Rupiasih, Ph.D.  
Dr. Hery Suyanto

Cover Design : I Ketut Putra, M.Si.

Hak cipta yang dilindungi Undang-undang

Hak Penerbitan pada : Universitas Udayana

Dicetak oleh : Jonggrang Printing

d.a : Jl. Tukad Batanghari 42e, Panjer, Denpasar, Bali  
Phone: (0361)8755999

**PANITIA SEMINAR FISIKA NASIONAL (SFN) XXVII  
THE 4<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON THEORETICAL  
AND APPLIED PHYSICS (ICTAP)**

- Pelindung** : Prof. Dr. dr. Ketut Suastika, Sp.PD-KEMD (Rektor UNUD)  
**Penanggung Jawab** : Ir. A.A. Gde Raka Dalam, M.Sc (Hons) (Dekan FMIPA UNUD)  
**Penasehat** : Prof. Dr. Mitra Djamil (Ketua HFI)  
Dr. Kuwat Triyana (Wakil Ketua HFI)  
Drs. I Made Satrya Wibawa, M.Si (PD I FMIPA UNUD)  
Drs. Nyoman Widana, M.Si (PD II FMIPA UNUD)  
I.B. Suryatika, S.Si, M.S.i (PD III FMIPA UNUD)  
Ir. H. S. Poniman, M.Si (Kajur Fisika FMIPA UNUD)  
Dr. Ir. Hery Suyanto, M.T (Ketua HFI Bali)
- Ketua** : Ni Nyoman Rupiasih, S.Si, M.Si, Ph.D  
**Wakil Ketua** : Dr. Drs. A. A. Ngurah Gunawan, MT  
Dr. Drs. I Wayan Gede Suharta, M.Si
- Sekretaris** : Supardi, S.Si, M.Si  
**Bendahara** : Nyoman Wendri, S.Si.,M.Si
- PerlengkapandanTransportasi :**  
I Ketut Putra, S.Si., M.Si. (Koordinator).  
I Ketut Sukarasa, S.Si., M.Si  
Komang Ngurah Suarbawa, S.Si.,M.Si.
- Konsumsi :**  
Dra.I Gusti Agung Ayu Ratnawati, M.Si (Koordinator)  
Dra. Ni Nyoman Ratini, M.Si
- Acara :**  
Gusti Ngurah Sutapa, S.Si., M.Si (Koordinator)  
I Made Yuliara, S.Si., M.T
- Pubdedok :**  
I Gusti Agung Putra Adnyana, S.Si., M.Si (Koordinator)  
I Gusti Agung Widagda, S.Si., M.Kom
- Sidang :**  
Ir. Putu Suardana, M.Si (Koordinator)  
Drs. Ida Bagus Alit Paramarta, M.Si  
Drs. I Nengah Simpan, M.Si  
I Nengah Artawan, S.Si., M.Si  
Ir. Ida Bagus Sujana Manuaba, M.Sc
- Sekretariatan :**  
Drs. Made Sumadiyasa, M.Si (Koordinator)  
Ni Luh Putu Trisnawati, S.Si., M.Si
- Penggalian Dana :**  
Ni Komang Tri Suandayani. S.Si.,M.Si (Koordinator)  
Ir. Windaryoto, M.Si.  
Ir. Winardi Tjahyo Baskoro, MT.  
I Gde Antha Kasmawan, S.Si., M.Si

## KATA PENGANTAR

Simposium Fisika Nasional (SFN) XXVII adalah kegiatan tahunan Himpunan Fisika Indonesia (HFI) yang diselenggarakan bersamaan dengan *The 4<sup>th</sup> International Conference on Theoretical and Applied Physics 2014* (ICTAP 2014) di Universitas Udayana pada tanggal 16-17 Oktober 2014, Denpasar-Bali. Panitia Penyelenggara Simposium kali ini adalah HFI Pusat bekerjasama dengan HFI Cabang Bali. Adapun tema khusus yang diusung pada Simposium kali ini adalah “Fisika Untuk Kehidupan Sehari-hari”.

Penyelenggaraan SFN ini diisi dengan penyajian 5 makalah undangan serta 136 makalah paralel yang terbagi dalam 9 Kelompok Fisika yaitu Fisika Teori dan Komputasi, Material Maju dan nano teknologi, Biofisika dan Medis, Geofisika, Astrofisika, Instrumentasi, Laser dan Optoelektronika, Fisika Energi dan Lingkungan, dan Fisika Pendidikan. Makalah undangan pertama disampaikan oleh Prof. Hermawan K. Dipojono, Ph.D. dari Ditjen DIKTI dengan judul “*Computational Materials Design for Future Development of Sustainable Energy*” dan makalah undangan kedua oleh Prof. Dr. Bambang Widiyatmoko dari Pusat Penelitian Fisika LIPI dengan judul “*Stabilisasi Frekuensi Laser Diode dan Potensi Aplikasi Dalam Membangkitkan mm-Wave*”. Makalah undangan ketiga disampaikan oleh Prof. Dr. Halmar Halide dari Jurusan Fisika, FMIPA Universitas Hasanuddin dengan judul “*Penggunaan El Nino Southern Oscillation (Enso) Untuk Prediksi Bencana Alam – Dimana Posisi Kita ?*”. Makalah undangan keempat disampaikan oleh Prof. Dr. Bobby Eka Gunara dari Jurusan Fisika, FMIPA Institut Teknologi Bandung dengan judul “*Recent Developments In 4D Black Hole Physics*”. Makalah undangan terakhir oleh Dr. Hery Suyanto dari Jurusan Fisika, FMIPA Universitas Udayana dengan judul “*Aplikasi Laser Pada Konsep Dasar Teori Fisika*”. Selain itu, telah dilaksanakan pula rapat Pleno anggota HFI sebagai cara rutin dan wajib dalam setiap penyelenggaraan Simposium Fisika Nasional.

Peserta Simposium yang hadir terdiri atas para fisikawan baik anggota maupun bukan anggota HFI yang berasal dari sejumlah Perguruan Tinggi Negeri dan Swasta (Universitas Negeri Makassar, FKIP UHAMKA Jakarta, UIN Maulana Malik Ibrahim Malang, PPs Unsyiah, Pusat Penelitian Fisika LIPI, Universitas Syiah Kuala, IPB Bogor, UIN Maliki Malang, Universitas Negeri Jakarta, Universitas Negeri Semarang, ITB, Universitas Muhammadiyah Makassar, STKIP Singkawang, Universitas Udayana (UNUD), SMA Negeri 1 Mamasa, UNSRI, Universitas Andalas, LAPAN, Universitas Brawijaya, Universitas Pattimura, Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Djati Bandung, Universitas Negeri Medan, Universitas Advent Indonesia, Universitas Riau, Universitas Sumatera Utara, Universitas Hasanuddin, PT. Astra Honda Motor, Universitas Negeri Surabaya (UNESA), UGM, Parahyangan Catholic University, Politeknik Negeri Banjarmasin, STKIP Singkawang, Universitas Negeri Malang, Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi-Badan Tenaga Nuklir Nasional, Unpad, Institut Teknologi Indonesia, Universitas PGRI Semarang, Universitas Gunadarma, Universitas Jenderal Soedirman, Universitas Palangka Raya, UIN Malang, Universitas Syiah Kuala, ITS, Universitas Pendidikan Ganesha, Universitas Negeri Semarang, Politeknik Negeri Bandung, Universitas Khairun, Universitas Cenderawasih Jayapura, Universitas Jenderal Soedirman, Universitas Kristen Satya Wacana, Universitas Pelita Harapan, dan Universitas Mataram).

Akhirnya, kami mohon maaf yang sebesar-besarnya atas segala kekurangan serta ketidaksempurnaan pada Prosiding ini serta berharap semoga Prosiding Simposium Fisika Nasional XXVII dapat memberikan manfaat serta kontribusi yang berarti bagi dunia ilmu pengetahuan umumnya dan bagi ilmu Fisika khususnya.

Denpasar, 19 Maret 2015

Tim Editor

**JADWAL ACARA SIMPOSIUM FISIKA NASIONAL 2014  
(SFN XXVII) 17 Oktober 2014  
DENPASAR BALI**

<b>WAKTU</b>	<b>ACARA</b>	<b>RUANG</b>
7.00 - 8.00	Registrasi	Gedung Pasca Sarjana
8.00 - 8.45	Pembukaan	Aula Pasca Sarjana
8.45 - 9.00	Istirahat	Gedung Pasa Sarjana
9.00 - 12.15	Pleno : 1. Hermawan Kresno Dipojono (ITB) 2. Bambang Widiatmoko (LIPI) 3. Halmar Halide (UNHAS) 4. Bobby Eka Gunara (ITB) 5. Hery Suyanto (UNUD)	Aula Pasca Sarjana
12.15 - 13.00	Ishoma/Pertemuan Fisikawati	Gedung Pasca Sarjana
13.00 - 16.00	Sesi Paralel	Gedung Pasca Sarjana dan Gedung Fakultas Pertanian

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>PEMBICARA UTAMA</b>	
PU-1	xiv
Computational Materials Design for Future Development of Sustainable Energy, <i>Hermawan Kresno Dipojono, Mohammad Kemal Agusta, Viny Veronika Tanuwijaya, Hasna Afifah, Andam Deatama Refino, Muhammad Naufal Lintangpradipto, Listra Yehezkiel Ginting</i> .....	
PU-2	xv
Stabilisasi Frekuensi Laser Diode dan Potensi Aplikasi Dalam Membangkitkan mm-Wave, <i>Bambang Widiyatmoko</i> .....	
PU-3	xvi
Penggunaan El Nino Southern Oscillation (ENSO) Untuk Prediksi Bencana Alam - Dimana Posisi Kita ?, <i>Haqmar Halide</i> .....	
PU-4	xvii
Recent Developments In 4D Black Hole Physics, <i>Bobby Eka Gunara</i> .....	
PU-5	xviii
Aplikasi Laser Pada Konsep Dasar Teori Fisika, <i>Hery Suyanto</i> .....	
<b>ASTROFISIKA</b>	
A 101	1-10
Kajian Tentang Metode Hartree Fock Bogoliubov Pada Kerak Bintang Neutron, <i>Eko Tri Sulistyani, I Putu Eka Widya Pratama</i> .....	
A 102	11-17
Kajian Tentang Sifat Kerak Luar Bintang Neutron Dengan Penghampiran Model Massa Hartree Fock Bogoliubov, <i>I Putu Eka Widya Pratama, Eko Tri Sulistyani</i> .....	
<b>FISIKA TEORI</b>	
FT 101	18-23
Implikasi Ukuran Maksimum Sambungan pada JJ-SNS sebagai Komponen SQUID Berdasarkan Model Ginzburg-Landau Termodifikasi, <i>Hari Wisodo, Arif Hidayat, Pekik Nurwantoro, Agung Bambang Setio Utomo, Ery Latifah</i> .....	
FT 102	24-27
Rancang Bangun Linux PC Cluster berbasis MPI Untuk Komputasi Berkinerja Tinggi, <i>Octaviamus Cakra Satya, Menik Ariani</i> .....	
<b>FISIKA ENERGI DAN LINGKUNGAN</b>	
FL 101	28-32
Pengujian Gasifikasi Biomasa Melalui Reaktor <i>Circulating Fluidized Bed</i> , <i>Muhammad Affendi, Sugiyatno, Imam Djunaedi, Haifa Wahyu</i> .....	
FL 102	33-43
Kinerja Reaktor Kolom Gelembung untuk Produksi Biodiesel dengan Berbagai Jenis <i>Sparger</i> , <i>Joelianingsih, Rusnia Junita Hakim, Ita Supriatin</i> .....	
FL 103	44-47
Karakteristik Minyak Bumi Di Palung Bengkalis (Pulau Padang dan Sekitarnya) Selat Malaka, <i>Falisa</i> .....	
FL 104	48-52
Analisis Efek Rumah Kaca di Indonesia, <i>Indah Susanti dan Sinta Berliana Sipayung</i> .....	
FL 105	53-56
Aplikasi <i>Artificial Neural Network</i> (ANN) untuk Estimasi Profil Vertikal Temperatur dan Kelembapan dari Data Modis, <i>Sinta Berliana Sipayung, Risyanto dan Edy Maryadi</i> .....	
FL 106	57-62
Realisasi Sistem Akuisisi Arus Dalam Optimasi Daya Sel Surya, <i>Ade Agung Harnawan, Eka Suarso, Iwan Sugriwa, Suharto</i> .....	
FL 107	63-69
STUDI ALTERNATIF PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS DI PULAU BAWEAN, <i>Sugiyatno, Imam Djunaedi, Mohammad Affendi</i> .....	
FL 108	70-76
Analisis Variabilitas Konsentrasi Uap Air dengan Suhu Permukaan di Indonesia Periode 2003-2012, <i>Ninong Komala</i> .....	
FL 109	77-83
Analisis Sifat Hujan Periode 15 Tahun Terakhir Berbasis Data Satelit TRMM Di Pulau Jawa, <i>Lely Qodrita Avia</i> .....	
FL 110	84-89
Pengaruh Aerosol Pada Awan Dan Keseimbangan Radiasi, <i>Rosida dan Indah Susanti</i> .....	
FL 111	90-98
Tren CO <sub>2</sub> Dan Potensi Hujan Asam Di Beberapa Kota Indonesia, <i>Tuti Budiwati, Indah Susanti dan Wiwiek Setyawati</i> .....	

## MATERIAL MAJU DAN NANOTEKNOLOGI

MN 101	Pengujian Serbuk Komersial $\text{LiFePO}_4$ Sebagai Bahan Aktif Katoda Baterai Lithium untuk Mobil Listrik Nasional, <i>Achmad Subhan, Fadli Rohman, Titik Lestariningsih, R. Ibrahim Purawardi</i> .....	325-329
MN 102	Studi Komposisi Fasa dan Sifat Kemagnetan Bijih Besi <i>Magnetite</i> Aceh Besar, <i>Adi Rahwanto, Deviyani Rusdiyanti Putri dan Zulkarnain Jalil</i> .....	330-333
MN 103	Sintesis Superkonduktor $\text{YBa}_{2-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Dengan Variasi Unsur Y dan La, <i>I Gede Cahya Pradana, Gusti Agung Widagda, Wayan Gede Suharta</i> .....	334-338
MN 104	Sintesis Material Fotokatalis $\text{TiO}_2$ Untuk Penjernihan Air Limbah Tekstil, <i>Astuti, Sri Mulyadi, Risda Tussa'adah</i> .....	339-342
MN 105	Pengaruh Lama Pengendapan pada Kopresipitasi Sintesis Nano Hidroksiapatit dari Batuan Calcite Alam Druju Malang Terhadap Kristalinitas dan Kekerasannya, <i>Yudyanto, Markus Diantoro, Hartatiek, Lia Septiani</i> .....	343-352
MN 106	Limbah FlyAsh (Abu Terbang) Batubara PLTU Asam-asam Sebagai Bahan Campuran Bata Ringan, <i>Ninis Hadi Haryanti</i> .....	353-359
MN 107	Pengaruh Tekanan Pengepresan dan Temperatur Pada Hidrogen Storage Keratin dan Mg, <i>Erna Hastuti, Nova Kartika, Azizah Fi Ahliha</i> .....	360-364
MN 108	Karakterisasi Campuran Nano Partikel Abu Sekam Padi Dan Abu Boiler Kelapa Sawit Menjadi Nano Komposit Termoplastik HDPE, <i>Eva Marlina Ginting, Nurdin Bukit</i> .....	365-372
MN 109	Sintesis Zeolit Dari Abu Sekam Padi Sebagai Absorban Karbon Monoksida (Co) Kendaraan Bermotor, <i>Farhani Maula, Abd. Haris, Subaer</i> .....	373-378
MN 110	Pemanfaatan Karbon Aktif Ampas Tebu ( <i>Bagasse</i> ) Sebagai Adsorben Untuk Menurunkan Kadar Polutan Anorganik Dalam Air, <i>Haryani, Muris, Subaer</i> .....	379-383
MN 111	Fabrikasi Lapisan Transparan dan Fleksibel Komposit Nanopartikel $\text{ZnO/Carboxymethyl Cellulose}$ (CMC), <i>Horasdia Saragih</i> .....	384-389
MN 112	Pengaruh Molar NaOH Terhadap Struktur Nanopartikel ZnO Dengan Menggunakan Metode Kopresipitasi, <i>Hosana Robertus, Jasruddin dan Subaer</i> .....	390-394
MN 113	Analisis dan Karakterisasi Pembuatan Nanokomposit Karet Alam/Bentonit dengan Glysidil Metacrilate, <i>Kurnia Sembiring, Riani Sari Sembiring</i> .....	395-402
MN 114	Pengaruh Penambahan Abu Boiler Kelapa Sawit Dalam Meningkatkan Kekuatan Beton, <i>Karya Simulingga dan Remi Napitupulu</i> .....	403-409
MN 115	Ketergantungan Tc Terhadap Medan Magnet Pada Superkonduktor Fase (Bi,Pb)-2212 Terdoping Nd, <i>Made Sumadiyasa, Putu Suardana, I Gusti Agung Putra Adnyana, Gelys Anisa Nindri</i> .....	410-416
MN 116	Pengaruh Penambahan $\text{CaCO}_3$ Terhadap Sifat Fisis Geopolimer Berbahan Dasar Abu Terbang ( <i>Fly Ash</i> ), <i>Asnaeni Ansar, Syamsidar. D, Armayani. M, Subaer</i> .....	417-421
MN 117	Identifikasi Fasa $\text{Zn}_{0,2}\text{Mg}_{0,8}\text{TiO}_3$ (ZMT) Pada Variasi Temperatur Kalsinasi Dengan Metode Pencampuran Larutan, <i>Nur Ichzan AS, Vicran Zharvan, Muhammad Saukani</i> .....	422-425
MN 118	Pengaruh Komposisi Agregat Zircon Terhadap Struktur Mikro Dan Daya Tahan Panas Komposit Geopolimer, <i>Nurfadilla, Subaer dan Nurhayati</i> .....	426-430
MN 119	Mekanisme Deposisi Film Tipis Karbon Amorf Terhidrogenasi, <i>Putut Marwoto</i> .....	431-437
MN 120	Studi Tentang Struktur Mikro Keramik Rekayasa <i>Silicon Carbide</i> (SiC) Berbahan Dasar Abu Sekam Padi & Grafit Pensil 2B, <i>Resky Irfanita, Jasruddin, dan Subaer</i> .....	438-443
MN 121	Strategi Peningkatan Industri Rotan Indonesia Melalui Produksi Serat Rotan Sebagai Filler Komposit, <i>Siti Nikmatin, Nares Nugroho, Farah Fahma</i> .....	444-447
MN 122	Optimalisasi Pemakaian Energi di Industri Pengecoran Besi Melalui Audit Energi, <i>Sugiyatno, Muhammad Affendi</i> .....	448-452

## Mekanisme Deposisi Film Tipis Karbon Amorf Terhidrogenasi

Putut Marwoto

Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Semarang  
Kampus Sekaran, Gunungpati, Semarang 50229  
email: pmarwoto@yahoo.com

### Abstrak

Film karbon a-C:H telah berhasil dideposisikan dengan menggunakan metode dc-PECVD. Film dideposisikan pada suhu 30°C, dengan campuran 2 sccm gas CH<sub>4</sub> + 3 sccm Ar, jarak elektroda 2 cm dengan tekanan operasi masing-masing 0,08 torr, 0,1 torr, 0,2 torr dan 0,4 torr. Eksperimen menunjukkan bahwa tegangan operasi plasma merupakan fungsi tekanan reaktor. Film tipis a-C:H yang ditumbuhkan telah dianalisis dengan menggunakan spektrometer *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dan spektroskopi Raman. Hasil spektrum inframerah dan spektrum Raman menunjukkan bahwa film yang dideposisikan mempunyai struktur ikatan karbon hibrida sp<sup>3</sup> dan sp<sup>2</sup> dengan rasio ikatan sp<sup>3</sup>/sp<sup>2</sup> yang bergantung pada tegangan operasi plasma. Berdasarkan hasil eksperimen dapat dikemukakan mekanisme deposisi film a-C:H. Pada tegangan operasi plasma tinggi (tekanan rendah), tumbukan antar partikel dengan energi tinggi dalam plasma menghasilkan struktur ikatan karbon terhibridisasi sp<sup>2</sup> yang dapat membentuk kluster. Sebaliknya pada tegangan operasi rendah (tekanan tinggi), energi tumbukan antar partikel rendah, namun peluang tumbukan antar partikel menjadi besar. Hal ini mengakibatkan peningkatan terbentuknya ikatan hibrida sp<sup>2</sup>. Film a-C:H dengan ikatan karbon hibrida sp<sup>3</sup> optimum diperoleh pada tegangan operasi plasma 0,46 kV (tekanan 0,1 torr)

**Kata kunci :** film tipis a-C:H, PECVD, spektrometer FTIR, spektroskopi Raman, mekanisme deposisi

### 1. PENDAHULUAN

*Diamond-like carbon* (DLC) merupakan salah satu bahan yang menarik para peneliti karena dapat ditumbuhkan pada suhu kamar [1]. Bahan ini mempunyai pola difraksi yang menunjukkan struktur amorf [2]. DLC mempunyai sifat yang ekstrim seperti kekerasan, modulus kekenyalan, afinitas elektron negatif dan bersifat inert secara fisika maupun kimia seperti halnya pada intan [3].

Ketika digunakan hidrokarbon dalam proses penumbuhan DLC, diperoleh film karbon amorf terhidrogenasi (a-C:H). Film tersebut terdiri dari jaringan karbon amorf dengan struktur tetrahedral seperti intan atau heksagonal seperti grafit [4]. Bahan ini menunjukkan sifat-sifat mekanik seperti kekerasan yang tinggi, gesekan yang rendah dan mempunyai sifat yang stabil seperti intan [5,6]. Kekerasan yang tinggi dan stabilitas kimia film karbon bergantung pada struktur ikatan antar atom karbon [7]. Perkembangan selanjutnya, film berbasis karbon seperti a-C:N juga telah berhasil ditumbuhkan [8]. Bahan a-C:H telah diterapkan dalam industri sebagai bahan isolator, bahan penyalut (coating) dalam industri mesin, dan piranti elektronik.

Secara umum sifat-sifat film a-C:H bergantung pada struktur ikatan sp<sup>3</sup>, sp<sup>2</sup> dan sp<sup>1</sup> antar atom-atom karbon dan konsentrasi hidrogen dalam film [8]. Dibandingkan dengan film silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H), struktur a-C:H jauh lebih kompleks karena atom karbon dapat membentuk orbital terhibridisasi [3]. Seperti halnya pada struktur, mekanisme deposisi film a-C:H juga sangat kompleks dan penjelasannya masih belum memuaskan karena melibatkan berbagai kondisi dan parameter deposisi. Namun demikian, menurut Kim [8], faktor utama yang menentukan ikatan sp<sup>3</sup> dan konsentrasi hidrogen dalam film a-C:H adalah kondisi penumbuhan. Selanjutnya menurut Theye dan Paret [10], film a-C:H yang dengan energi ionik rendah akan menghasilkan film dengan mikrostruktur mirip polimer, sedangkan film yang ditumbuhkan dengan energi ionik tinggi akan menghasilkan film dengan mikrostruktur mirip intan. Secara umum struktur karbon amorf dapat dikenal pasti berdasarkan spektrum pergeseran Raman (Raman shift) dengan dua puncak utama, yaitu pada 1580 cm<sup>-1</sup> (G) dan 1350 cm<sup>-1</sup> (D) [2]. Intensitas puncak I<sub>G</sub> dan I<sub>D</sub> masing-masing menunjukkan intensitas fase grafit dan fase ketidakteraturan. Secara kualitatif penyusutan rasio I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> digunakan sebagai petunjuk peningkatan rasio

ikatan  $sp^3/sp^2$  [11], sedangkan peningkatan rasio  $I_D/I_G$  menunjukkan peningkatan ketidakaturan film a-C:H [12]

Metode *plasma enhanced chemical vapour deposition* (PECVD) merupakan metoda yang biasa digunakan dalam menumbuhkan film tipis a-C:H. Sistem PECVD pada dasarnya merupakan proses deposisi material yang menggunakan bantuan plasma untuk meningkatkan proses reaksi kimia yang terjadi di dalam reaktor. Sebagai pembangkit plasma biasanya digunakan *radio frequency* (rf), *direct current* (dc), atau *microwave*. Pada kertas kerja sebelumnya telah dilaporkan bahwa film a-C:H telah berhasil ditumbuhkan dengan metode dc-PECVD dan berpotensi sebagai pemancar cahaya pada daerah ultraviolet [13].

Mekanisme reaksi kimia yang berlaku dalam proses pembentukan film dalam metode PECVD sangat kompleks dan sulit untuk dijelaskan [14, 15]. Secara kualitatif Robertson [2] dan von Keudell et.al [16] masing-masing telah mengajukan model deposisi film a-C:H. Namun demikian, model tersebut tidak secara kuantitatif mengaitkan dengan parameter deposisi secara langsung. Dalam kertas kerja ini akan dibahas mekanisme deposisi film a-C:H yang ditumbuhkan dengan metode dc-PECVD. Pembahasan dilakukan berdasarkan hasil analisis spektrum *Fourier Transform Infrared* (FTIR) spektrum Raman yang dikaitkan dengan parameter tegangan operasi plasma. Secara teoritis, dapat dikemukakan bahwa tegangan operasi plasma berperan dalam menentukan tingkat energi ionik di dalam plasma.

## 2. EKSPERIMEN

Sampel film a-C:H dideposisikan di atas substrat *corning glass* dengan menggunakan sistem reaktor PECVD konvensional [14]. Sebagai gas sumber digunakan campuran metana ( $CH_4$ ) dan argon (Ar) masing-masing 2 sccm dan 3 sccm dengan jarak elektroda 2 cm. Seluruh sampel dideposisikan pada suhu 30°C. Sebelum dimasukkan di dalam reaktor, substrat dibersihkan secara berturut-turut dengan larutan trikloroetilen, aseton dan metanol masing-masing dalam waktu 30 menit dengan menggunakan pembersih ultrasonik selanjutnya dibilas dengan aquades dan dikeringkan. Kemudian substrat dibersihkan dengan menggunakan plasma argon dalam

waktu 15 menit di dalam reaktor sebelum film ditumbuhkan. Sampel film tipis a-C:H ditumbuhkan dengan tekanan yang divariasikan, seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Seluruh sampel ditumbuhkan dalam waktu 4 jam.

Tabel 1. Senarai sampel yang ditumbuhkan dengan variasi tekanan reaktor

Sampel	Tekanan (torr)
S1	0,08
S2	0,1
S3	0,2
S4	0,4

Analisis spektrum inframerah (FTIR) dan spektrum Raman sampel a-C:H dilakukan dengan menggunakan spektrometer Sistem 2000R NIR FT-Raman (Perkin Elmer). Untuk memperoleh spektrum inframerah, tiap-tiap sampel diimbas sebanyak 100 kali dengan resolusi 4  $cm^{-1}$ . Spektrum Raman diperoleh dengan mengimbas setiap sampel sebanyak 100 kali dan resolusi 2  $cm^{-1}$ . Sampel masing-masing diobservasi dalam rentang 3200 – 3700  $cm^{-1}$  untuk spektrum inframerah dan 1250 – 1700  $cm^{-1}$  untuk spektrum Raman. Seluruh sampel dikarakterisasi pada suhu kamar.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

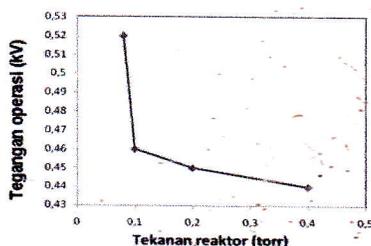
### Analisis Struktur

Pada proses deposisi film, catu daya DC dilaraskan pada tegangan 1,5 kV dan pada masing-masing tekanan reaktor yang telah ditetapkan akan menunjukkan harga tegangan operasi yang berbeda-beda. Tabel 1 menunjukkan tegangan operasi untuk tekanan reaktor yang berbeda-beda. Pengaruh tekanan reaktor pada tegangan operasi ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 2. Tegangan operasi untuk berbagai tekanan reaktor

Tekanan Operasi (torr)	Tegangan Operasi (mA)
0,08	0,52
0,1	0,46
0,2	0,45
0,4	0,44

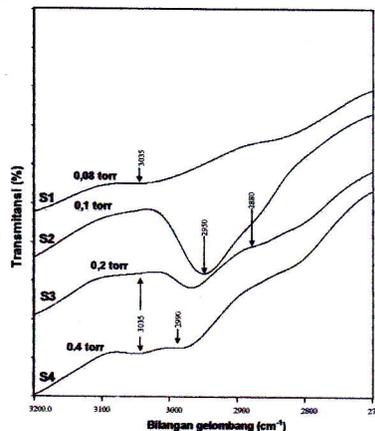
Gambar 1 menunjukkan bahwa pada tekanan 0,08 torr diperoleh tegangan operasi paling tinggi (0,52 kV) dan turun secara drastis ketika tekanan dinaikkan hingga 0,1 torr (0,46 kV). Pada tekanan antara 0,1 – 0,4 torr, tegangan operasi menurun hampir linier, yaitu dari 0,46 – 0,44 kV. Hal ini menunjukkan bahwa pada tekanan rendah partikel-partikel dalam plasma (ion dan elektron) mempunyai lintasan bebas rata-rata yang besar dan energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan energi partikel-partikel dalam plasma pada tekanan yang lebih tinggi.



Gambar 1. Tegangan operasi plasma sebagai fungsi tekanan reaktor

Pada Gambar 2 dapat dilihat spektrum inframerah sampel film tipis a-C:H yang dideposisikan masing-masing pada tekanan 0,08 torr, 0,1 torr, 0,2 torr dan 0,4 torr. Sampel yang dideposisikan pada tekanan 0,1 torr (sampel S2) memperlihatkan spektrum inframerah dengan amplitudo pita serapan yang tajam dengan puncak di sekitar 2950  $\text{cm}^{-1}$ . Pita serapan tersebut menunjukkan adanya superposisi puncak-puncak serapan 2955  $\text{cm}^{-1}$  (ikatan  $\text{sp}^3$  asimetri), 2920  $\text{cm}^{-1}$  (ikatan  $\text{sp}^3 \text{CH}_2$  asimetri dan ikatan  $\text{sp}^3 \text{CH}$ ), 2885  $\text{cm}^{-1}$  yang lemah (ikatan  $\text{sp}^3 \text{CH}_3$  asimetri) dan 2990 – 3000  $\text{cm}^{-1}$  yang lemah (ikatan  $\text{sp}^2 \text{CH}$  aromatik) [2].

Pita serapan dengan puncak  $\sim 2950 \text{ cm}^{-1}$  menyusut secara drastis ketika tekanan diturunkan hingga 0,08 torr (sampel S1). Meskipun dengan intensitas lemah, tampak pada sampel S1 munculnya pita serapan di sekitar 3035  $\text{cm}^{-1}$ , yang menunjukkan terbentuknya ikatan  $\text{sp}^2 \text{CH}$  [2]. Pita serapan 2950  $\text{cm}^{-1}$  semakin melemah dan bergeser menuju pita serapan  $\sim 2990 \text{ cm}^{-1}$  ketika tekanan reaktor ditingkatkan hingga 0,2 torr (sampel S3).



Gambar 2. Spektrum FTIR film a-C:H yang ditumbuhkan dengan variasi tekanan reaktor.

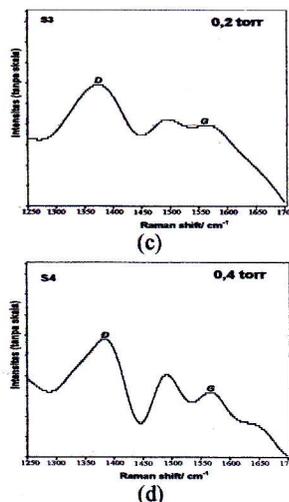
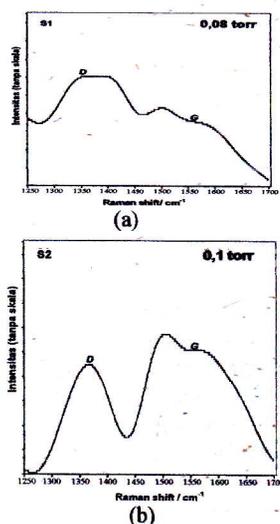
Hal ini menunjukkan bahwa ragam ikatan  $\text{sp}^3$  pada sampel tersebut mulai menyusut, sedangkan konsentrasi ikatan  $\text{sp}^2 \text{CH}$  aromatik pada pita serapan di sekitar 2990 – 3000  $\text{cm}^{-1}$  mulai meningkat. Selanjutnya, pita serapan masing-masing di sekitar 2990 dan 3035  $\text{cm}^{-1}$  semakin menguat ketika tekanan ditingkatkan hingga 0,4 torr (sampel S4). Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa konsentrasi ikatan  $\text{sp}^3$  yang optimum diperoleh pada sampel yang ditumbuhkan pada tekanan 0,1 torr (sampel S2).

Gambar 3 menunjukkan spektrum Raman untuk masing-masing sampel yang ditumbuhkan pada tekanan 0,08 torr, 0,1 torr, 0,2 torr dan 0,4 torr. Seluruh sampel yang ditumbuhkan menunjukkan puncak pita grafit G (1559 – 1569  $\text{cm}^{-1}$ ) dan pita ketidakteraturan D (1361 – 1381  $\text{cm}^{-1}$ ). Sampel yang ditumbuhkan pada tekanan 0,08 torr (S1) menunjukkan puncak pita G pada 1565  $\text{cm}^{-1}$  dan puncak pita D pada 1365  $\text{cm}^{-1}$ , sedangkan sampel yang dideposisikan pada tekanan 0,1 torr (S2) menunjukkan puncak pita G pada 1559  $\text{cm}^{-1}$  dan puncak pita D pada 1368  $\text{cm}^{-1}$ . Sampel yang dideposisikan pada tekanan 0,2 torr (S3) memperlihatkan puncak pita G pada 1563  $\text{cm}^{-1}$  dan puncak pita D pada 1374  $\text{cm}^{-1}$ , sedangkan sampel yang dideposisikan pada tekanan 0,4 torr (S4) memperlihatkan puncak pita G pada 1569  $\text{cm}^{-1}$ , sedangkan sampel yang dideposisikan pada tekanan 0,4 torr (S4) memperlihatkan puncak pita D pada 1383  $\text{cm}^{-1}$ . Selain itu, seluruh film yang dideposisikan menunjukkan terbentuknya

puncak pada  $\sim 1500 \text{ cm}^{-1}$ . Puncak tersebut kemungkinan berasal dari rantai hidrokarbon dalam film yang ditumbuhkan [17]. Selanjutnya pada sampel S1 menunjukkan puncak pita yang melebar antara  $1350 - 1400 \text{ cm}^{-1}$  yang mengindikasikan adanya superposisi antara dua puncak pita, yaitu puncak pita  $D \sim 1365$  dan puncak pita  $G \sim 1565$  dan puncak pita  $\sim 1400 \text{ cm}^{-1}$ . Puncak  $\sim 1400 \text{ cm}^{-1}$  menunjukkan terjadinya struktur nanokristalin pada film tersebut sebagaimana dilaporkan oleh Bugaev et al [18].

Berdasarkan hasil analisis spektrum inframerah dapat dikemukakan bahwa film tipis yang dideposisikan menunjukkan struktur hibrida  $sp^2$  dan  $sp^3$  dengan ikatan  $\text{CH}$ ,  $\text{CH}_2$  dan  $\text{CH}_3$ . Selanjutnya berdasarkan analisis spektrum Raman telah diperoleh bahwa film yang dideposisikan menunjukkan struktur pita  $G$  dan  $D$ . Dengan demikian, secara umum dapat dikatakan bahwa film yang dideposisikan merupakan film karbon amorf terhidrogenasi (a-C:H).

Pengaruh tegangan operasi plasma terhadap posisi puncak pita  $G$  dan  $D$  sampel film a-C:H yang dideposisikan ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa posisi puncak pita  $G$   $1569 \text{ cm}^{-1}$  bergeser ke posisi  $1559 \text{ cm}^{-1}$  ketika tegangan operasi  $0,44 \text{ kV}$  bertambah menjadi  $0,46 \text{ kV}$ , dan posisi puncak pita  $G$   $1559 \text{ cm}^{-1}$  bergeser ke posisi  $1565 \text{ cm}^{-1}$  ketika tegangan operasi  $0,46 \text{ kV}$  meningkat menjadi  $0,52 \text{ kV}$ . Bergesernya puncak pita  $G$  pada bilangan gelombang yang lebih besar menunjukkan peningkatan kluster dalam film [2].

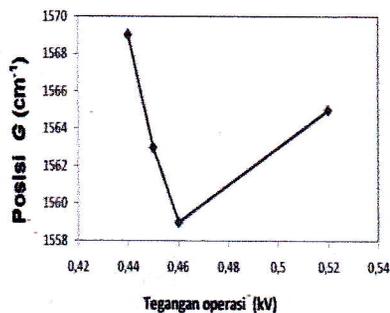


Gambar 3. Spektrum Raman film a-C:H yang ditumbuhkan dengan tekanan reaktor masing-masing: (a) 0,08 torr, (b) 0,1 torr, (c) 0,2 torr dan (d) 0,4 torr.

Begesernya posisi puncak pita  $D$   $1383 \text{ cm}^{-1}$  menuju posisi puncak pita  $D$   $1365 \text{ cm}^{-1}$  ketika tegangan operasi bertambah dari  $0,44 \text{ kV}$  menjadi  $0,62 \text{ kV}$  ditunjukkan pada Gambar 5.

Tabel 2. Rasio  $I_D/I_G$  masing-masing sampel

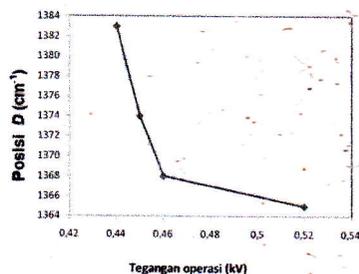
Sampel	Rasio $I_D/I_G$
S1	1,6
S2	0,9
S3	1,6
S4	2,7



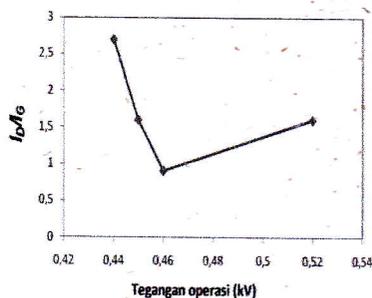
Gambar 4. Pengaruh tegangan operasi plasma terhadap posisi puncak pita  $G$ .

Gambar 6 menunjukkan pengaruh tegangan operasi plasma terhadap rasio  $I_D/I_G$  film a-C:H yang dideposisikan. Dapat dilihat

dari Gambar 6 bahwa rasio  $I_D/I_G$  berkurang ketika film a-C:H yang dideposisikan dengan tegangan operasi bertambah dari 0,44 kV menjadi 0,46 kV. Namun demikian, rasio  $I_D/I_G$  kembali meningkat ketika tegangan operasi bertambah dari 0,46 kV menjadi 0,62 kV. Film a-C:H yang dideposisikan pada tegangan operasi plasma 0,46 kV mempunyai rasio  $I_D/I_G$  minimum. Dengan demikian, mengacu pada hasil eksperimen Cho et al [11] dapat dikatakan bahwa film tipis a-C:H yang dideposisikan dengan tegangan operasi plasma 0,46 kV merupakan film dengan konsentrasi ikatan  $sp^3$  paling tinggi. Rasio  $I_D/I_G$  konsisten dengan spektrum inframerah film a-C:H yang dideposisikan.



Gambar 5. Pengaruh tegangan operasi terhadap posisi puncak pita D.



Gambar 6. Pengaruh tegangan operasi plasma terhadap rasio  $I_D/I_G$ .

### Mekanisme deposisi

Menurut Robertson [2], mekanisme deposisi film a-C:H terdiri atas tiga tahap, yaitu: reaksi dalam plasma (penguraian, pengionan dan sebagainya), interaksi plasma-permukaan, dan reaksi yang terjadi di bawah permukaan film. Dalam deposisi film dapat terjadi tumbukan antara ion dan molekul netral seperti molekul gas  $CH_4$ , monoradikal  $CH_3$ , diradikal dan partikel tidak jenuh seperti  $C_2H_4$  atau  $C_2H_2$ . Di dalam plasma dapat juga

dijumpai atom-atom H. Menurut von Keudell [16], molekul-molekul hidrokarbon netral hanya dapat bereaksi dengan permukaan film dan tidak mampu menembus film, sedangkan ion mampu menembus film yang sudah terdeposisi dan berperanan dalam memindahalihkan H dari ikatan C-H dalam film, sehingga H dapat bergabung kembali dengan atom-atom H yang lain membentuk molekul  $H_2$ .

Dalam eksperimen, telah dideposisikan film a-C:H dengan menggunakan arus dc. Film dideposisikan dari plasma pada elektroda negatif (katoda). Dalam proses plasma, ion akan dipercepat menuju katoda, sedangkan elektron dipercepat menuju elektroda positif (anoda). Pada tekanan rendah (0,08 torr), jumlah partikel dalam plasma (ion dan elektron) tidak banyak sehingga masing-masing partikel mempunyai energi yang tinggi. Hal ini dapat dilihat dari tegangan operasi plasma yang tinggi (0,52 kV). Pada tegangan operasi tinggi, ion-ion  $CH_3^+$  yang berikatan hibrida  $sp^3$  akan mempunyai energi yang tinggi ketika menumbuk substrat. Akibatnya, ikatan hibrida  $sp^3$  akan terputus sehingga membentuk ikatan  $sp^2$  yang lebih stabil. Selain itu, tumbukan antar ion dengan ikatan hibrida  $sp^3$  atau dengan ion yang lain,  $Ar^+$  misalnya juga dapat menghasilkan ikatan hibrida  $sp^2$  yang stabil. Oleh karena itu dari hasil spektrum inframerah, dapat dilihat bahwa sampel menunjukkan serapan pada  $\sim 3035\text{ cm}^{-1}$  (ikatan  $sp^2CH$ ). Peristiwa tumbukan tersebut juga dapat menyebabkan terlepasnya ikatan hidrogen (H) dari karbon. Lepasnya hidrogen dari ikatan  $C(sp^3)$  juga dapat menghasilkan struktur ikatan rangkap  $C(sp^2)=C(sp^2)$  yang baru [19]. Menurut Bource et al [20], energi ion yang tinggi pada deposisi film a-C:H akan menghasilkan film dengan unit  $C=CH_2$ . Atom-atom C dengan ikatan rangkap ( $sp^2$ ) dapat membentuk cincin aromatik segi enam, kluster cincin aromatik segi enam, atau kumpulan aromatik lainnya [21]. Peningkatan ikatan hibrida  $sp^2$  dapat diobservasi dari spektrum Raman yang menunjukkan bergesernya puncak pita G ke posisi yang besar ( $1569\text{ cm}^{-1}$ ), dan rasio  $I_D/I_G$  yang tinggi. Selain itu, tumbukan antara atom-atom C dengan ikatan hibrida  $sp^2$  berenergi tinggi dengan substrat akan menghasilkan struktur film nanokristalin.

Ketika film a-C:H dideposisikan pada tekanan yang tinggi (0,4 torr), jumlah partikel dalam plasma menjadi banyak sehingga energinya rendah. Dapat dilihat dari Gambar 1, bahwa pada tekanan 0,4 torr, plasma mempunyai tegangan operasi 0,44 kV. Pada tekanan yang tinggi, jumlah partikel di dalam plasma menjadi lebih banyak. Sebagai akibatnya, jarak antar partikel menjadi lebih dekat sehingga peluang partikel-partikel untuk bertumbukan menjadi lebih besar. Hal ini menyebabkan terputusnya ikatan C-H dan meningkatkan terbentuknya ikatan hibrida  $sp^2$ . Terbentuknya ikatan hibrida  $sp^2$  pada film a-C:H tersebut tampak dari spektrum inframerah yang menunjukkan vibrasi pada  $3035\text{ cm}^{-1}$  ( $sp^2\text{CH}$ ) dan  $2990 - 3000\text{ cm}^{-1}$  yang lemah (ikatan  $sp^2\text{CH}$  aromatik). Seperti pada kasus film yang ditumbuhkan pada tegangan operasi tinggi, peningkatan rasio  $I_D/I_G$  juga menunjukkan peningkatan ikatan hibrida  $sp^2$ . Diperolehnya mikrostruktur mirip polimer  $\sim 1500\text{ cm}^{-1}$  pada spektrum inframerah disebabkan oleh tumbukan ion berenergi rendah [10].

Ketika film ditumbuhkan pada tekanan 0,1 torr, tegangan operasi plasma berada pada 0,46 kV. Serapan yang kuat pada pita  $\sim 2950\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan bahwa film tersebut mempunyai kandungan ikatan hibrida  $sp^3$  yang optimum dibandingkan dengan sampel yang lain. Hasil ini konsisten dengan spektrum Raman yang menunjukkan puncak pita  $G$  pada harga terkecil dan rasio  $I_D/I_G$  terkecil. Film tersebut masih menunjukkan mikrostruktur polimer. Energi partikel pada tegangan operasi tersebut dapat menghasilkan rasio  $sp^3/sp^2$  yang optimum. Dengan demikian, dapat dikemukakan bahwa tegangan operasi 0,46 kV merupakan tegangan operasi plasma yang dapat menghasilkan film a-C:H dengan ikatan hibrida  $sp^3$  optimum.

#### 4. KESIMPULAN

Film karbon a-C:H telah berhasil dideposisikan dengan menggunakan metode dc-PECVD. Film dideposisikan pada suhu  $30^\circ\text{C}$ , dengan campuran 2 sccm gas  $\text{CH}_4 + 3\text{ sccm Ar}$ , jarak elektroda 2 cm dengan tekanan operasi masing-masing 0,08 torr, 0,1 torr, 0,2 torr dan 0,4 torr. Eksperimen menunjukkan tegangan operasi plasma merupakan fungsi tekanan reaktor. Hasil spektrum inframerah dan spektrum Raman menunjukkan bahwa

film yang dideposisikan mempunyai struktur ikatan karbon hibrida  $sp^2$  dan  $sp^3$  dengan rasio ikatan  $sp^3/sp^2$  yang bergantung pada tegangan operasi plasma. Berdasarkan hasil eksperimen dapat dikemukakan mekanisme deposisi film a-C:H. Pada tegangan operasi plasma yang tinggi, tumbukan antar partikel dengan energi tinggi dalam plasma banyak menghasilkan struktur ikatan karbon terhibridisasi  $sp^2$  yang dapat membentuk kluster cincin aromatik. Sebaliknya pada tegangan operasi rendah (tekanan tinggi), energi tumbukan antar partikel rendah, namun peluang tumbukan antar partikel menjadi besar. Hal ini mengakibatkan peningkatan terbentuknya ikatan hibrida  $sp^2$ . Film a-C:H dengan ikatan karbon hibrida  $sp^3$  optimum diperoleh pada tegangan operasi plasma 0,46 kV.

#### 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam membantu penyediaan sampel dan karakterisasi FTIR dan Raman diucapkan terimakasih.

#### 6. REFERENSI

1. J. Robertson and W. Milne, *Journal of Non-Crystalline Solids* **299-302**, 798 – 804 (1998).
2. H. Lee, "Theoretical Study of Diamond-like Carbon and Nucleation of Diamond", Ph.D. Thesis, Case Western Reserve University, 1993.
3. J. Robertson, *Materials Science and Engineering R* **37**, 129-281 (2002).
4. Sagnes, "Influence of DC Saddle-Field Discharge Deposition Parameters on the Structure of Hydrogenated Amorphous Carbon Semikonduktor", Ph.D Thesis, University of Toronto, 1998.
5. T. H. Fang, C. I. Weng, and M. J. Chiang, *Diamond and Related Materials* **11**, 1653 – 1659 (2001).
6. Y. Mokuno, A. Chayahara, Y. Horino, Y. Nishimura, *Surface and Coating Technology* **156**, 328 – 331 (2002).
7. Y-H, Son, W-C Joung and J-I Jeong, *Journal of Korean Physical Society* **39**, 713-717 (2001).
8. Essafi, J.L.G. Fierro, E. Ech-chamikh, *M. J. Condensed Matter* **12 (3)**, 227 – 229 (2010).
9. K. Kim, "Investigation of the Film Properties and Deposition Process of a-

- C:H Films Deposited with a Microwave ECR Plasma Reactor", Ph. D Thesis, Michigan State University, 2000.
10. M. L. Theye and V. Paret, *Carbon* **40**, 1153 – 1166 (2002).
  11. Y. O. Cho, J. M. Cho, W. J. Yun, E. K. Suh, K. H. Yu, S. C. Yu, J. K. Lee, *Diamond and Related Materials* **11**, 1848 – 1858 (2002).
  12. M. Lejune, O. Dourand-Drouhin, J. Henocque, R. Bouzerar, A. Zeinert, M. Benlahsen, *Thin Solids Films* **389**, 233 – 238 (2001).
  13. P. Marwoto, A. B. Suriani, dan S. Sakrani, "Struktur dan Fotoluminisensi Film Tipis Karbon Amorf Terhidrogenasi (a-C:H) yang Ditumbuhkan dengan Reaktor Palsama CVD", *Prosiding Seminar Nasional Fisika Makasar 2013* (SNF-MKS), 70 – 74 (2013).
  14. M. Konuma, *Thin Film Deposition by Plasma Techniques*, Berlin: Springer Verlag, 1992.
  15. R. Cote, *IBM Journal of Research and Development* **43**, 1 – 30 (1999).
  16. von Keudell, M. Meirer, and C. Hopf, *Diamond and Related Materials* **11**, 969 – 975 (2002).
  17. Y. Umehara, S. Murai, Y. Koide, and M. Muarakami, *Diamond and Related Materials* **11**, 1429 – 1435 (2002).
  18. S. P. Bugaev, K. V. Osmokov, V. G. Podkovyrov, D. V., Smaykina, Sochugov, *Surfact and Coating Technology* **135**, 18 – 26 (2000).
  19. Q. Zhang, S. F. Yoon, J. Ahn, Rusli, H. Yang, B. Gan, C. Yang, F. Watt, E. J. Teo, and T. Osipowice, *Diamond and Related Materials* **9**, 1758 – 1761 (2000).
  20. J. E. Bouree, C. Godet, B. Drevillon, R. Etemadi, T. Heitz, J. Cernogora, J. L. Fave, *Journal of Non-Crystalline Solids* **198 – 200**, 623 – 624 (1996).
  21. J. Robertson, *Curent Opinion in Solid State and Materials Sciences* **I(4)**, 557 – 561 (1996).