

**PEMERIKSAAN FILEM SiO₂ YANG
DIENAPKAN DI ATAS SUSBTRAT Si
MELALUI TEKNIK PIROLISIS SEMBURAN
ULTRABUNYI**

CAHYO BUDI NUGROHO

UNIVERSITI SAINS MALAYSIA

2010

**PEMERIKSAAN FILEM SiO₂ YANG DIENAPKAN
DI ATAS SUBSTRAT Si MELALUI TEKNIK
PIROLISIS SEMBURAN ULTRABUNYI**

oleh

CAHYO BUDI NUGROHO

**Tesis yang diserahkan untuk memenuhi
keperluan bagi Ijazah Sarjana Sains**

APRIL 2010

PENGHARGAAN

Dengan nama Allah yang Maha Pengasih dan Penyayang. Segala puji dan syukur kehadirat Allah swt. yang telah memberi saya peluang dan kekuatan untuk menyelesaikan projek ini dengan jayanya.

Pertama sekali saya ingin mengambil kesempatan ini, untuk mengucapkan jutaan terima kasih saya, di atas segala sokongan dan dorongan kepada semua pihak yang menyokong dan membantu saya dalam menyelesaikan projek ini. Tanpa tunjuk ajar serta nasihat, tidak mungkin saya dapat menyiapkan tesis ini.

Sekalung penghargaan dan kasih kepada penyelia saya Professor Madya. Ir. Dr. Cheong Kuan Yew, Prof. Dr Ahmad Fauzi dan Dr. Zainovia Lockman, atas segala nasihat dan galakan, serta tanpa jemu berkongsi pengetahuan, bukan sahaja dalam menyiapkan projek ini malah untuk kegunaan masa depan.

Saya juga mengambil peluang ini untuk menzahirkan rasa terima kasih kepada Dekan, Pensyarah, juruteknik makmal, Pusat Pengajian Kejuruteraan Bahan & Sumber Mineral untuk segala pertolongan dan bantuan sepanjang saya berada di sini. Khususnya En. Suhaimi, En. Rashid, En. Azam, En. Sharul, Puan Roslina and Puan Fong.

Kesempatan ini juga saya ingin mengucapkan penghargaan kepada rakan-rakan di makmal bahan elektronik iaitu Farah, Rehan, Azam, Syahriza, Napisah, Tedi, Aimi dan Pak Teguh. Serta mereka yang terlibat secara langsung atau tidak dalam menyiapkan tesis ini. Bantuan dan persahabatan yang diberikan sangat membantu.

Selain itu juga saya melahirkan rasa terima kasih kepada semua kawan kawan dalam PMPG, FT01 dan PPI Kampus Kejuruteraan, terutama Pak Wahyu, Fatur, Sudibyo, Iping, Zaki, Pak Sugeng, Pak Tri, Infal, Syamsiro, Pak Janter, Ir. Dr Syafrudin,

Prof. Syafalni, Dr Juwono, Dr. Sabar, Dr. Indra, Pak Endri untuk sokongan dan perkongsian ilmu.

Akhir sekali, saya mengambil peluang untuk berterimakasih kepada mendiang ayah saya (Sutrisno Alm.) dan ibu (Katmirah) yang selalu menjadi kekuatan inspirasi serta kakak (Rudi) dan keluarga saya atas cinta dan doa yang selalu dimunajadahkan kepada saya. Ucapan terima kasih khusus kepada Sri Zuliarni atas cinta, kesabaran dan doanya.

ISI KANDUNGAN

PENGHARGAAN	ii
ISI KANDUNGAN	iv
SENARAI JADUAL	x
SENARAI RAJAH	xi
SENARAI SINGKATAN	xv
SENARAI SIMBOL	xvi
ABSTRAK	xvii
ABSTRACT	xviii
BAB 1 - PENDAHULUAN	1
1.1 Pengenalan	1
1.2 Pernyataan masalah	5
1.3 Objektif	6
1.4 Skop penyelidikan	7
1.5 Organisasi Tesis	8
BAB 2 - KAJIAN PERSURATAN	9
2.1 Pengenalan	9
2.2 Fenomena gelombang ultrasonik semasa di dalam cecair.	12
2.2.1 Fenomena gelombang ultrabunyi liang melewati cecair menuju ke udara	16
2.3 Mekanisma perubahan titisan cecair menjadi filem pepejal	20
2.3.1. Keadaan kabus semasa di muncung	21

2.3.2 Perjalanan titisan menuju ke permukaan substrat	23
2.3.3 Hentaman titisan di permukaan substrat	24
2.2.4 Penyebaran titisan setelah hentaman	25
2.3.5 Pembentukan filem pepejal	27
2.4 Pengaruh parameter terhadap sifat fizik filem	31
2.4.1 Pengaruh suhu substrat	32
2.4.2 Pengaruh jarak muncung dengan substrat	35
2.4.3 Pengaruh jujukan semburan	36
2.4.4 Pengaruh diameter muncung	38
2.5 Persediaan prapenanda	38
2.5.1 Sol-gel Silika	39
2.5.2 Pengenapan filem dengan kaedah sol gel	39
2.5.2.1 Langkah pertama adalah penyediaan prapenanda	40
2.5.2.2 Teknik pengenapan prapenanda dari sol gel	42
2.5.3 Pengenapan filem SiO ₂ dengan teknik sol gel	47
2.5.3.1 Mejam	47
2.4.3.2 Celup	49
2.4.3.3 Semburan	50
BAB 3 - KAEDAH	52
3.1 Pengenalan	52
3.2 Rekabentuk dan membangun reaktor PSU	53
3.2.1 Penjana kabus (<i>mist generator</i>)	54

3.2.1.1 Transduser ultrabunyi (<i>ultrasonic transducer</i>)	55
3.2.1.2 Tabung kaca penampung air	57
3.2.1.3 Kebuk kabus (<i>mist chamber</i>)	57
3.2.2 Gas pembawa	60
3.2.3 Pemanas dan pengawalnya (<i>substrat heater</i>)	60
3.2.4 Kerangka reaktor	62
3.2.5 Operasi semburan	62
3.3 Pemilihan formula prapenanda	62
3.3.1 Pengenalan	62
3.3.2 Pengubahan isipadu HCl	65
3.3.3 Pengubahan isipadu etanol	65
3.3.4 Pengubahan isipadu air nyahion	66
3.4 Pembersihan substrat Si	67
3.4.1 Pengenalan	67
3.4.2 RCA 1 (pembersihan terhadap pencemaran organik)	67
3.4.3 Pembersihan oksida	68
3.4.4 RCA 2 (pembebasan dari logam berat dan pencemaran ionik atom)	69
3.5 Pengenapan SiO ₂ on Si	70
3.5.1 Pengenalan	70
3.5.2 Kesan suhu substrat dan jarak antara muncung dengan permukaan substrat	70
3.5.3 Kesan jujukan pengenapan	71

3.5.4 Kesan diameter muncung	72
3.6 Pencirian filem	72
3.6.1 Pengenalan	72
3.6.2 FTIR	72
3.6.3 SEM	73
BAB 4 - KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN	74
4.1 Pengenalan	74
4.2 Kesan Suhu Substrat	76
4.2.1 Mekanisma pembentukan filem pepejal sebagai fungsi kenaikan suhu substrat	84
4.2.1.1 Proses a, suhu substrat 60°C [Rajah 4.8(a)]	86
4.2.1.2 Proses b, suhu substrat 90°C [Rajah 4.8(b)]	86
4.2.1.3 Proses c, suhu substrat 120°C [Rajah 4.8(c)]	87
4.2.1.4 Proses d, suhu substrat 150°C [Rajah 4.8(d)]	87
4.3 Kesan jarak muncung dengan substrat	87
4.3.1 Mekanisma pembentukan filem pepejal sebagai fungsi jarak muncung dengan substrat	93
4.3.1.1 Proses a, jarak muncung dengan substrat 1.0 cm	95
4.3.1.2 Proses b, jarak muncung dengan substrat 1.5 cm	96
4.3.1.3 Proses c, jarak muncung dengan substrat 2.0 cm	96
4.3.1.4 Proses d, jarak muncung dengan substrat 3.0 cm	96
4.4 Kesan nombor jujukan semburan	97
4.4.1 Mekanisma pembentukan filem pepejal sebagai fungsi	104

kenaikan nombor jujukan semburan	
4.4.1.1. Proses A, nombor jujukan semburan 1 minit (1:1)	104
4.4.1.2. Proses B, nombor jujukan semburan 2 minit (2:1)	105
4.4.1.3. Proses C, nombor jujukan semburan 3 minit (3:1)	105
4.4.1.4. Proses D, nombor jujukan semburan 4 minit (4:1)	106
4.4.1.5. Proses E, nombor jujukan semburan 5 minit (5:1)	106
4.5 Kesan diameter muncung	107
4.5.1 Mekanisma pembentukan filem pepejal berdasarkan fungsi saiz diameter muncung	110
4.5.1.1 Proses 1.0, diameter muncung 1.0 cm [Rajah 4.22.(1.0)]	112
4.5.1.2 Proses 0.7, diameter muncung 0.7 cm [Rajah 4.22.(0.7)]	112
4.5.1.3 Proses 0.5, diameter muncung 0.5 cm [Rajah 4.22.(0.5)]	113
4.5.1.4 Proses 0.3, diameter muncung 0.3 cm [Rajah 4.22.(0.3)]	114
4.5.1.5 Proses 0.1, diameter muncung 0.1 cm [Rajah 4.22.(0.1)]	114
BAB 5 - KESIMPULAN DAN CADANGAN	116
5.1 Kesimpulan	116
5.2. Cadangan	117
RUJUKAN	119

SENARAI PENERBITAN	128
LAMPIRAN I	129
LAMPIRAN II	136
LAMPIRAN III	142
LAMPIRAN IV	147

SENARAI JADUAL

Jadual 3. 1	Senarai komponen-komponen pemanas	60
Jadual 3. 2	Bahan bahan yang digunakan dalam penyediaan prapenanda	64
Jadual 3. 3	Kombinasi dan hasil pengkabusan dari kesan pengubahan isipadu HCl	65
Jadual 3. 4	Kombinasi dan hasil pengkabusan dari kesan pengubahan isipadu Etanol	66
Jadual 3. 5	Kombinasi dan hasil pengkabusan dari kesan pengubahan isipadu air nyahion	66
Jadual 3. 6	Kombinasi ujikaji pada parameter suhu substrat dan jarak muncung ke substrat dengan masa semburan 15 min dan nombor jujukan semburan ditetapkan pada 1 sembur dan 1 min bertanggung	71
Jadual 4. 1	Senarai hasil EDX filem SiO ₂ yang diaplikasikan di atas permukaan substrat Si bagi suhu substrat 60°C dan 120°C	81
Jadual 4. 2	Senarai hasil EDX keratan rentas sampel yang diaplikasikan di atas substrat Si pada suhu substrat 60°C; jarak muncung substrat 3 cm; dan nombor jujukan 1 minit sembur dan 1 minit bertanggung	84
Jadual 4. 3	Hasil EDX SiO ₂ yang diaplikasikan di atas Si bagi jarak muncung dengan substrat 1 cm dan 2 cm	92
Jadual 4. 4	Hasil EDX SiO ₂ di atas Si sebagai fungsi jujukan semburan	101

SENARAI SINGKATAN

SINGKATAN	BAHASA INGGERIS	BAHASA MELAYU
AC	Alternating current	Electric ulang alik
CVD	Chemical vapor deposition	Enapan wap kimia
EDX	Energy dispersive X-Ray	Penyerakan tenaga sinar X
FTIR	Fourier transforms infrared	Fourier pengubah inframerah
PVD	Physical vapor deposition	Enapan wap fizikal
SEM	Scanning electron microscopy	Mikroskop imbasan elektron
PSU	Ultrasonic spray pyrolysis	Pirolisis semburan ultrabunyi

SENARAI SIMBOL

SIMBOL	KETERANGAN	UNIT
A	Luas kawasan	m ²
F _g	Daya graviti	gm/s ²
F _p	Daya tekanan	gm/s ²
g	Graviti	m/s ²
\dot{m}	Kadar aliran jisim	g/s
P	Tekanan	g/ms ²
ρ	Ketumpatan	g/m ³
v	Halaju	m/s
W	Berat	gm/s ²

PEMERIKSAAN FILEM SiO₂ YANG DIENAPKAN DI ATAS SUBSTRAT Si MELALUI TEKNIK PIROLISIS SEMBURAN ULTRABUNYI

ABSTRAK

Pirolisis semburan ultrabunyi (PSU) telah digunakan untuk menenapkan filem SiO₂ di atas substrat Si. Dalam rangka peneapan oksida di atas Si, reaktor USP telah direkabentuk dan dibina. Prapenanda yang digunakan sebagai sumber oksida ini adalah berdasarkan larutan Tetraetoksilana dan disediakan dengan kaedah sol gel. Setelah disediakan, prapenanda diatomkan untuk menjadi kabus dan disemburkan di atas permukaan Si yang panas menggunakan gas Argon. Kesan suhu substrat (60, 90, 120, 150°C), jarak muncung ke substrat (1, 1.5, 2, 3 cm), jujukan semburan (5, 4, 3, 2, 1 min sembur dengan 1 min bertangguh), dan diameter muncung (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0 cm) terhadap sifat fizikal filem telah dikaji secara sistematik. Kumpulan fungsian kimia telah ditentukan oleh spektrokopi Inframerah Transformasi Fourier (FTIR). Morfologi permukaan dicirikan mikroskop imbasan elektron pacaran medan. Komposisi unsur filem ditentukan oleh spektroskopi sinar-X serakan tenaga (EDX). Dengan mengubah parameter kajian, semua filem menunjukkan kumpulan ikatan Si-O, Si-Si dan hidroksil dari hasil analisis FTIR tapi ikatan karbonil tidak dijumpai. Keputusan ini disokong oleh analisis EDX, iaituhanya unsur Si dan O yang dirakam. Morfologi permukaan filem mengalami perubahan seiring dengan pengubahsuaian parameter, daripada bentuk kepingan hingga kepada filem padat. Struktur kimia daripada semua filem yang terhasil disusun oleh ikatan Si-O dan Si-OH namun ikatan karbonil tidak terkesan.

INVESTIGATION OF SiO₂ FILM DEPOSITED ON Si SUBSTRATE VIA ULTRASONIC SPRAY PYROLYSIS

ABSTRACT

Ultrasonic spray pyrolysis (USP) had been used to deposit SiO₂ film on Si substrate. In order to deposit the oxide on Si, USP reactor had been designed and constructed. Precursor used to derive the oxide was based on Tetraethoxysilane and it was prepared via sol gel method. After the precursor was prepared, it was atomized to mist and sprayed onto the pre-heated Si surface using an Argon gas. Effects of substrate temperature (60, 90, 120, 150°C), nozzle to substrate distance (1, 1.5, 2, 3 cm), spraying sequence (1, 2, 3, 4, 5 spray and 1 min delay) and nozzle diameter (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0 cm) on physical properties of the film have been systematically studied. Chemical functional group had been determined by Fourier transforms infrared (FTIR) spectroscopy. Surface morphology was characterized by field-emission scanning electron microscope. Elemental composition of the film was determined by energy dispersive X-ray spectroscopy(EDX). By changing the investigated parameters, all of the films revealed Si-O, Si-Si and hydroxyl groups from FTIR results but no carbonyl bonds were found. This result was supported by EDX analysis, in which only Si and O elements were recorded. Surface morphology of the investigated films showed an evolution along with the modification parameters, from the plate shape to compact layer. The evolution that occurred was used to support mechanisms of solid film formation from liquid droplets. Chemical structure of all film produced were arranged by Si-O and Si-OH bond but existence carbonyl bond was not detected.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan

Penyelidikan berkenaan dengan filem silikon dioksida (SiO_2) telah berkembang dengan pesat kerana SiO_2 filem banyak digunakan dalam pelbagai teknologi. Sifat bahan SiO_2 yang sangat keras dan lengai membuat filem SiO_2 digunakan sebagai pelindung bahan substrat dari serangan kakisan dan pengoksidaan (Wachtman & Haber, 1993). Sifat elektronik dan optik SiO_2 membuatkan bahan ini penting untuk digunakan di dalam peranti elektrik dan optik. Filem SiO_2 diaplikasikan di atas substrat silikon (Si) untuk digunakan sebagai penebat elektrik di dalam peranti elektronik. Penebat elektrik yang diperlukan dalam industri khususnya teknologi *complimentary metal oxide semiconductor* (CMOS) biasanya harus mempunyai ciri-ciri yang sesuai. Ciri-ciri tersebut adalah; kesesuaian kimia dengan substrat Si, kesesuaian proses dalam pembentukan logam yang disambung ke Si, kebolehan untuk proses litografi, mempunyai kestabilan kimia, fizikal dan struktur sepanjang penghasilan CMOS. SiO_2 memiliki ciri-ciri penebat elektrik yang baik sesuai untuk CMOS (Dąbrowski & Müssig, 2000).

Pelbagai teknik telah digunakan di dalam penghasilan filem SiO_2 di atas Si. Secara umumnya teknik tersebut terbahagi kepada penumbuhan dan pengenapan.

Penumbuhan adalah teknik penghasilan SiO_2 di atas Si dengan cara pengoksidaan terma Si. Teknik penganapan pula adalah kaedah penghasilan filem SiO_2 yang dihasilkan melalui enapan wap fizikal (physical vapor deposition atau PVD) dan wap kimia (chemical vapor deposition atau CVD). Kaedah kimia basah seperti sol-gel juga pesat digunakan.

Pengoksidaan terma adalah teknik yang menggunakan suhu tinggi untuk pertumbuhan lapisan oksida. Pengoksidaan terma boleh dilakukan dalam persekitaran kering dengan menggunakan O_2 (Ito et al., 1997) atau keadaan basah dengan menggunakan H_2O . Filem SiO_2 yang dihasilkan biasanya mempunyai ketebalan dalam julat 60-10000 Å dengan suhu pengoksidaan di antara 800 hingga 1100°C. Namun, pada suhu yang tinggi ini keadaan fizikal substrat boleh terjejas dan juga pengoksidaan hanya sesuai apabila substrat yang digunakan adalah Si (Yang & Saraswat, 2000). Teknik ini tidak boleh dilakukan jika SiO_2 perlu dihasilkan di atas substrat lain.

PVD adalah teknik enapan atomistik di mana bahan dikabuskan dari bahan mula yang akan membentuk atom atau molekul, lalu dibawa ke dalam ruang vakum dengan aliran gas. Teknik PVD yang biasa digunakan ialah pemercitan Frekuensi Radio (Tomozeiu., 2008), pemercitan reaktif (Thornton., 1978), dan pemercitan dua ion alur (Minami et al., 2003). Teknik ini telah menghasilkan filem berkualiti unggul, tetapi belum pernah digunakan secara meluas disebabkan kos penyelenggaraanya dan alatan yang tinggi, kelemahan dalam amaun bahan berserbuk yang dapat dimasukkan di dalam kebuk dan kadar pengubahsuaian yang lambat. Kelemahan ini membuat kaedah ini tidak digunakan meluas di dalam industri.

Dalam kaedah CVD, filem yang dihasilkan berasal dari larutan yang bertindak balas dan terurai pada permukaan substrat. Larutan yang biasa digunakan adalah tetraetoksilana (TEOS) kerana larutan ini memiliki kemampuan untuk menghasilkan kualiti yang lebih baik berbanding larutan lain. Suhu penguraian TEOS adalah antara 650°C dan 750°C (Barron., 1996). Namun demikian, kaedah CVD ini mempunyai kekurangan iaitu tidak semua bahan dapat digunakan dalam teknik ini, kos yang mahal dalam menyiapkan ujikaji, suhu tinggi untuk penguraian bahan mengakibatkan terjadinya tegasan dan pengembangan substrat. Untuk mengurangkan suhu penguraian, CVD telah diubahsuai seperti menggunakan kebuk vakum ultratinggi (George et al., 2004), plasma peningkatan (plasma enhance) (Kim et al., 2001), pancuran radikal (Kumagai, et al., 2002), dan sinar-ion teraruh tenaga rendah (Matsutani et al., 2004). Walau bagaimanapun, harga reaktor yang jauh lebih mahal dan gas pembawa yang diperlukan menyebabkan risiko letupan menjadi masalah utama teknik ini.

Kaedah kimia basah melalui sol-gel adalah teknik di mana larutan dari campuran partikel yang sangat halus di dalam keadaan cecair (disebut sebagai sol) akan diubah menjadi jisim yang mempunyai kelikatan yang tinggi (gel) (Sakka & Kamiya, 1982). Semasa enapan filem, tahap gel dilanjutkan semasa pengeringan dan rawatan haba dilakukan untuk mendapatkan filem pepejal. Teknik sol-gel digunakan untuk menyediakan filem nipis melalui teknik celupan dan putaran di mana sol digunakan sebagai larutan.

Teknik celupan adalah proses di mana substrat dikenakan dengan cara menurulkannya ke dalam silika sol dan diangkat pada kelajuan yang sesuai. Teknik ini menghasilkan filem nipis SiO₂ di atas permukaan substrat.

Salah satu keburukan teknik pencelupan ialah pegenapan akan berlaku pada kedua-dua belah permukaan substrat. Selepas dikenakan rawatan haba dalam aplikasi peranti elektronik, biasanya hanya satu permukaan sahaja diperlukan. Teknik untuk pembuangan lapisan filem yang tidak diperlukan mesti dilakukan dan ini merumitkan proses fabrikasi. Kaedah putaran pula adalah proses di mana sol silika dititiskan ke atas substrat dan kemudian diputar dengan kelajuan tinggi. Kaedah ini boleh menghasilkan filem pada satu permukaan. Kedua-dua teknik ini memiliki kelemahan utama iaitu, tahap pengeringan yang perlu dikawal dan penghasilan filem terhad pada skala kecil. Filem yang dihasilkan daripada teknik ini juga akan mengalami pengecutan yang besar dan mempunyai keliangan yang banyak. Jika rawatan haba tidak dikawal filem terhasil akan mempunyai sisa hidroksida dan karbon (Yeatman et al., 1995).

Pirolisis semburan ultrabunyi (PSU) adalah teknik yang menggunakan getaran ultrabunyi untuk memisahkan partikel-partikel prapenanda menjadi kabus. Kabus kemudiannya akan dibawa oleh gas pembawa menuju ke permukaan satu substrat yang telah dipanaskan. Kabus yang terenap di permukaan substrat, membentuk satu lapisan filem oksida yang padat. Proses ini boleh digunakan untuk penghasilan filem oksida pada tekanan atmosfera (García-Sánchez, et al., 2008). Kelebihan utama teknik ini dibandingkan dengan teknik lain adalah proses yang mudah, kos pembuatan reaktor yang rendah, mampu untuk pembuatan filem dalam skala besar dan kebolehan untuk mengelakkan kerosakan substrat. PSU telah digunakan untuk enapan SiO_2 di atas substrat titanium dan sodium silikat digunakan sebagai prapenanda (Jokanovic et al., 2008). Walaupun mudah, persiapan prapenanda memerlukan langkah yang rumit dan perlu dioptimumkan. Reaktor juga perlu direka bentuk.

Rekabentuk reaktor yang dibina memungkinkan titisan cair berubah bentuk menjadi serbuk selama pengangkutan dalam tiub kuartza yang dipanaskan sebelum menghentam ke atas substrat. Kedudukan enapan di mana enapan terbentuk dari atas ke bawah substrat memungkinkan filem yang dihasilkan memiliki ketebalan 3-15 μm . Oleh itu, suhu 800°C selama 4 jam diperlukan supaya enapan dapat tersebar keseluruhan permukaan substrat (Jokanovic et al.,2008).

1.2 Pernyataan masalah

PSU adalah teknik yang paling cekap jika dibandingkan dengan teknik yang lain. Teknik ini mampu menghasilkan filem padat dalam waktu yang singkat dan hanya memerlukan suhu yang lebih rendah. Penghasilan reaktor yang tidak terlalu rumit dan mudah untuk dibuat serta kos pembuatan juga murah. Penjana kabus dengan menggunakan getaran ultrabunyi terbukti mampu menghasilkan kabus dengan penggunaan tenaga yang rendah. Tambahan lagi, penjana kabus jenis ini dapat digunakan untuk pelbagai larutan dengan kelikatan yang cukup rendah (Yasuda, et al., 2005). Pada dasarnya reaktor yang baik adalah reaktor yang mempunyai kebolehan menghasilkan filem berkualiti tinggi dengan proses yang memerlukan sedikit tenaga, mudah dikawal dan dapat digunakan untuk penghasilan pada skala besar.

Selain itu, persiapan prapenanda juga merupakan perkara penting dalam teknik PSU. Jenis sumber prapenanda, kelikatan, dan teknik persiapan mempengaruhi sifat fizikal dan kimia prapenanda. Oleh itu, struktur dan sifat prapenanda dapat disesuaikan dengan mengubah dari penyediaan prapenanda. TEOS sebagai larutan prapenanda

didapati paling berkesan di dalam sol-gel. Teknik enapan larutan prapenanda ialah melalui celupan dan putaran (mejam). Teknik semburan belum lagi dicuba. Tiada laporan yang berkenaan dengan teknik ini dijumpai.

Kombinasi teknik PSU dan solgel berasas TEOS sebagai sumber untuk penganapan filem SiO_2 di atas permukaan substrat Si ternyata merupakan perkara baru. Oleh itu, kajian penghasilan filem SiO_2 yang diaplikasikan di atas Si melalui teknik PSU dijalankan di dalam projek ini. Kajian sifat fizikal ke atas filem yang dihasilkan dikaji. Sifat fizikal terdiri dari morfologi permukaan, struktur kimia, ketebalan filem, dan komposisi elemen. Sifat fizikal ini sangat penting kerana ia menentukan bagaimana filem ini dapat diguna pakai. Nyatanya, suhu substrat, jarak antara muncung dengan substrat, nombor jujukan semburan, ukuran garis pusat muncung, dan rawatan haba mempengaruhi sifat fizikal filem. Oleh itu, parameter-parameter ini dikaji di dalam projek ini.

Projek ini merangkumi dua aspek utama; 1. Reka bentuk dan pembinaan reaktor PSU dan 2. Penghasilan dan pencirian filem terhasil dari reaktor PSU. Pada bahagian penghasilan filem, pelbagai parameter seperti yang telah dinyatakan tadi dikaji. Teknik pencirian yang piawai digunakan untuk mengukur ciri-ciri filem.

1.3 Objektif

Objektif dari penyelidikan ini adalah untuk:

1. menghasilkan reaktor Pirolisis Semburan Ultrabunyi (PSU) untuk kegunaan penganapan.
2. menghasilkan filem SiO₂ menggunakan PSU reaktor yang dibina.
3. mengkaji kesan parameter penganapan iaitu: suhu substrat, jarak muncung ke substrat, jujukan semburan dan saiz diameter muncung terhadap filem yang terhasil.
4. mendapatkan nilai optimum bagi parameter penganapan filem SiO₂.

1.4 Skop penyelidikan

Skop penyelidikan ini adalah seperti di bawah:

1. Merekabentuk dan membina reaktor pirolisis semburan ultrabunyi.
2. Penyediaan prapenanda diikuti dengan penghasilan sol SiO₂ dan seterusnya kabus.
3. Penyemburan kabus di atas substrat Si dilakukan oleh reaktor PSU untuk penghasilan filem SiO₂.
4. Suhu substrat semasa penganapan adalah suhu rendah dengan suhu tertinggi adalah 150°C.
5. Kesan parameter penganapan ialah suhu substrat, jarak muncung ke substrat, nombor jujukan semburan dan garis pusat muncung.
6. Pengkajian ciri-ciri fizikal bahan terhasil ialah morfologi permukaan, struktur kimia, ketebalan filem dan komposisi elemen.
7. Menentukan keadaan optimum daripada parameter penganapan.

1.5 Organisasi Tesis

Tesis ini dibahagi kepada 5 bab dan diringkaskan seperti di bawah:

Bab 1 sebagai pengenalan terhadap filem SiO₂ dan teknik-teknik yang telah digunakan untuk penghasilan filem pepejal SiO₂. Selain itu, bab ini juga menandakan kenyataan masalah, objektif dan skop kajian.

Bab 2 memberikan gambaran keseluruhan proses PSU, serta parameternya dalam proses penganapan. Asas teori, fenomena pengangkutan titisan, dan kesan parameter penganapan ditunjukkan secara terperinci. Dalam bab ini juga menerangkan kaedah sol-gel sebagai kaedah yang digunakan untuk persediaan prapenanda beserta contoh-contoh pembuatan filem SiO₂ melauiteknik celup dan putar.

Bab 3 menjelaskan eksperimen daripada penyelidikan ini. Rekabentuk reaktor dan kegunaanya dijelaskan secara terperinci. Begitu juga dalam pemilihan formula prapenanda dan pembersihan permukaan Si substrat dari pencemaran organik dan oksidasi semula jadi dikemukakan dalam bab ini.

Bab 4 menunjukkan keputusan dan perbincangan dari pada hasil ujikaji dalam penyelidikan ini. Kesan parameter penganapan seperti suhu substrat, jarak antara muncung dan substrat, jujukan waktu penyemburan, saiz diameter muncung, dan penyepuhlindapan pascapenganapan diacarakan sebagai pengaruh terhadap pembentukan sifat fizikal filem yang dihasilkan.

Bab 5 meringkaskan perbincangan daripada keputusan yang telah diperolehi. Cadangan untuk ujikaji pada masa depan juga telah diberikan.

BAB 2

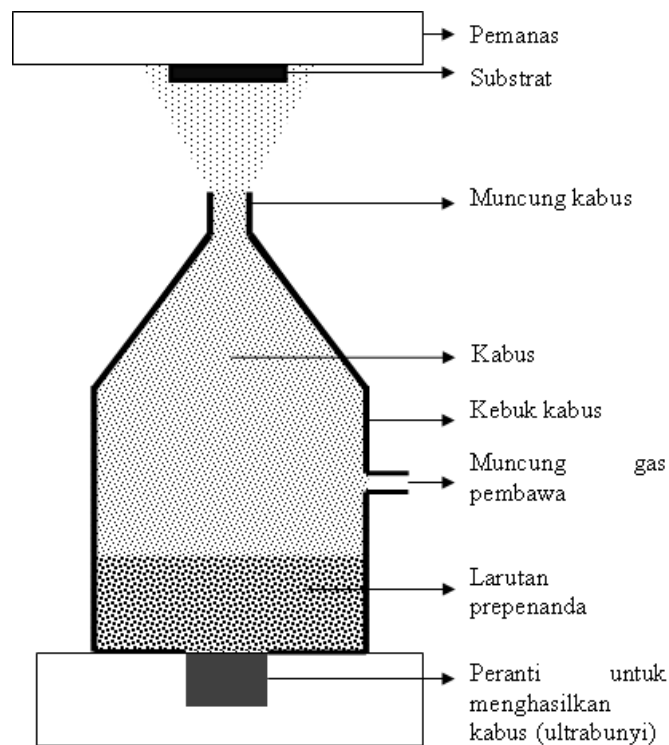
KAJIAN PERSURATAN

2.1 Pengenalan

Bab ini membincangkan tentang penganapan filem oksida melalui kaedah pirolisis semburan ultrabunyi (PSU). Secara terperinci dijelaskan mengenai asas kaedah pirolisis semburan ultrabunyi untuk penghasilan filem oksida yang berkualiti. Terdapat banyak kajian persuratan berkenaan proses penganapan filem oksida melalui kaedah PSU. Beberapa parameter proses yang memberi kesan yang nyata terhadap sifat fizikal filem diringkaskan dan diterangkan di dalam bab ini. Walaupun begitu, tidak banyak laporan berkenaan dengan penghasilan SiO_2 melalui kaedah sol-gel PSU tidak seperti penghasilan menggunakan kaedah celupan dan putaran. Penyediaan prapenanda sebagai sumber SiO_2 filem berdasarkan kaedah sol-gel dibincangkan serta ringkasan berkenaan dengan penghasilan filem ini melalui kaedah sol-gel juga dipaparkan.

Rajah 2.1 menunjukkan lakaran peralatan penganapan filem dengan kaedah PSU. Pirolisis semburan ialah teknik untuk mengempakan lapisan atau serbuk pepejal di atas permukaan substrat panas dengan cara penyemburan. Di dalam lakaran ditunjukkan kedudukan substrat yang dilekatkan pada pemanas. Kaedah penganapan ini memerlukan larutan cecair yang akan ditukar menjadi kabut dengan getaran dari peranti ultrabunyi. Kabut yang terhasil di dalam kebuk kabut (seperti dalam rajah 2.1) akan dibawa berdekatan dengan substrat panas melalui satu muncung dan akan diempakan

setelah kabus dihentam pada permukaan substrat. Bergantung kepada ciri-ciri larutan (prapenanda kabus), dan suhu substrat, pirolisis yang berlaku akan membentuk lapisan pepejal filem atau serbuk. Kabus dibawa oleh gas pembawa dan oleh kerana kabus berada di dalam tekanan tinggi, aerosol akan terhasil pada muncung dan seterusnya menghentam substrat.



Rajah 2. 1 Lakaran ringkas proses penempatan filem dengan kaedah PSU.

Proses ini banyak digunakan dalam penghasilan filem nipis, pelapisan dan serbuk seramik (Mooney & Reading., 1982). Penghasilan filem nipis melalui PSU adalah mudah dan kos prosesnya relatif lebih murah (Biswas, 1986; Maissel & Glang, 1970;

Perednis et al., 2005; Wachtman et al., 1993). Kaedah ini juga menawarkan kemudahan dalam penyediaan filem dengan berbagai komposisi dengan tidak memerlukan substrat atau larutan prapenanda yang berkualiti tinggi. Kerana ciri-ciri proses yang menarik, kaedah ini dipertimbangkan untuk menghasilkan filem nipis seramik untuk pelbagai kegunaan (Bian et al., 2004; García-Sánchez et al., 2008; Jkanovic et al., 2008; Zaouk et al., 2006).

Seperti di dalam rajah 2.1, dilihat bahawa di dalam satu reaktor PSU terdapat beberapa komponen penting seperti berikut: (1) pengatom (di dalam rajah 2.1 ditunjukkan peranti ultrabunyi), (2) kebuk yang memuatkan larutan prapenanda dan (3) pemegang, pemanas dan pengawal suhu substrat (Messing et al., 1993).

Selain peranti ultrabunyi, terdapat pelbagai teknik pengatoman yang biasa digunakan dalam kaedah pirolisis semburan seperti letupan udara dan elektrostatik. Di dalam letupan udara, cecair diatomkan dengan cara didedahkan di dalam pecutan aliran udara (Balkenende et al., 1996). Teknik ini memerlukan tenaga yang cukup besar dengan itu kelengkapan yang mahal. Selain itu, dimensi titisan yang terbentuk tidak begitu sekata dimensinya dan menghasilkan filem yang tidak sekata

Elektrostatik pula adalah teknik mengenakan satu medan elektrik yang tinggi pada cecair (Chen et al, 1997). Voltan tinggi digunakan untuk menghasilkan medan elektrik ini. Oleh itu, teknik ini memerlukan tenaga elektrik yang tinggi.

Ultrabunyi adalah proses penghasilan kabus yang menggunakan peranti transduser ultrabunyi. Cecair berubah menjadi kabus apabila dikenakan getaran ultrabunyi. Teknik ini mampu menghasilkan titisan yang berdimensi agak seragam.

Tenaga yang diperlukan juga rendah (Muzgin et al., 1976; Barreras et al., 2002). Selain itu, teknik ultrabunyi memungkinkan keadaan sebagai berikut: isipadu cecair (larutan prapenanda) tidak terlalu banyak, aliran udara (gas pembawa) yang sederhana dan boleh dilakukan pada tekanan udara biasa tanpa berkehendakkan vakum. Oleh itu, penggunaan ultrabunyi untuk pengatom cecair lebih berkesan berbanding dengan teknik letupan udara dan elektrostatik.

Kaedah pirolisis semburan yang menggunakan ultrabunyi sebagai pengatom dinamakan pirolisis semburan ultrabunyi (PSU) atau “ultrasonic spray pyrolysis” (USP). Setelah pegatoman larutan prapenanda berlaku dan terhasilnya kabus, kabus ini kemudiannya dibawa dengan gas pembawa menuju ke permukaan substrat yang panas. Di permukaan substrat panas tersebut, titisan-titisan yang terdapat di dalam kabus, akan menghentam dan tersebar kemudian satu lapisan akan terbentuk. Pada keadaan yang tertentu, penghentaman akan menghasilkan serbuk seramik. Di dalam tesis ini penghasilan kabus dihasilkan dengan gelombang ultrabunyi. Untuk itu asas berkenaan dengan penghasilan kabus melalui gelombang ultrabunyi akan dibentangkan.

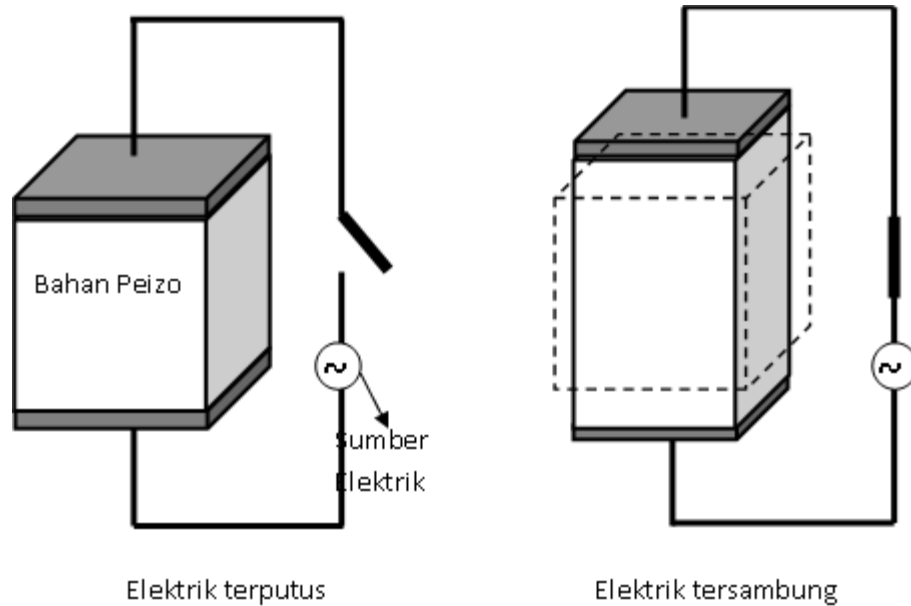
2.2 Fenomena gelombang ultrabunyi semasa di dalam cecair

Gelombang ultrabunyi adalah jenis gelombang mekanik kerana gelombang ini tidak dapat bergerak melalui kawasan vakum tapi boleh bergerak pada media cecair, udara dan pepejal. Getaran gelombang ini mempunyai frekuensi melebihi 20 kHz. Gelombang ultrabunyi dihasilkan oleh transduser yang mampu mengubah ayunan elektromagnetik kepada getaran mekanik elastik. Transduser biasanya mendapatkan

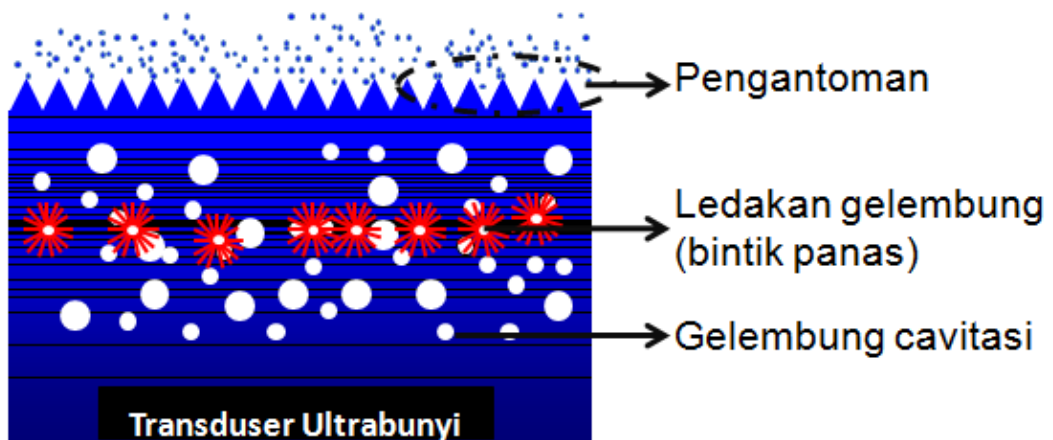
tenaga dari sumber elektrik. Bahagian transduser yang memainkan peranan untuk mengubah tenaga elektrik ke tenaga mekanik adalah peranti piezoelektrik. Peranti ini diperbuat daripada bahan-bahan piezoelektrik tipikal seperti kuartza SiO_2 , berlinit, AlPO_4 , galium ortofosfat, GaPO_4 , tourmalina, barium titanat, BaTiO_3 , dan plumbum zirkonat titanat titanate (Virgil et al., 1982). Jika bahan-bahan tersebut tercas dengan adanya tenaga elektrik, cas berkutub positif dan negatif akan saling menjauh menghasilkan pengkutuban elektrik di dalam bahan (Qin, 2001). Pengkutuban ini akan mengakibatkan perubahan dimensi bahan sehingga terhasil perubahan pada dimensi bahan (perubahan mekanik). Perubahan dimensi ini dilakarkan pada rajah 2.2 untuk menunjukkan perubahan dimensi apabila sumber elektrik disambung pada bahan. Perubahan akan terjadi berulang kali jika sumber elektrik yang dikenakan kepada bahan adalah bersifat ulang alik (alternating current, (AC)). Frekuensi perubahan yang berulang-alik menyebabkan bahan piezoelektrik akan berubah dimensinya secara cepat sekali seolah-oleh ia bergetar (Yang, 2006). Getaran terhasil akibat perubahan dimensi bahan inilah yang digunakan untuk menghasilkan gelombang ultrabunyi.

Gelombang ultrabunyi yang dihasilkan berdekatan dengan cecair akan boleh mengubah keadaan cecair itu. Perubahan adalah diakibatkan oleh aliran dan tekanan yang dikenakan kepada cecair oleh gerakan gelombang ultrabunyi. Penghasilan gelembung-gelembung di dalam cecair dan pengkabusan di permukaan cecair dengan udara menunjukkan adanya perubahan tersebut. Hal tersebut diilustrasikan dalam rajah 2.3 di mana apabila transduser ultrabunyi diletakkan berhampiran dengan cecair (berwarna biru di dalam lakaran), cecair akan berubah, pada permukaan atasnya

pengatoman berlaku menghasilkan kabus. Di dalam cecair, gelembung terhasil kesan daripada getaran yang dikenakan dari transduser ultrabunyi.



Rajah 2.2 Lakaran untuk menunjukkan perubahan dimensi bahan piezoelektrik apabila sumber elektrik disambung.

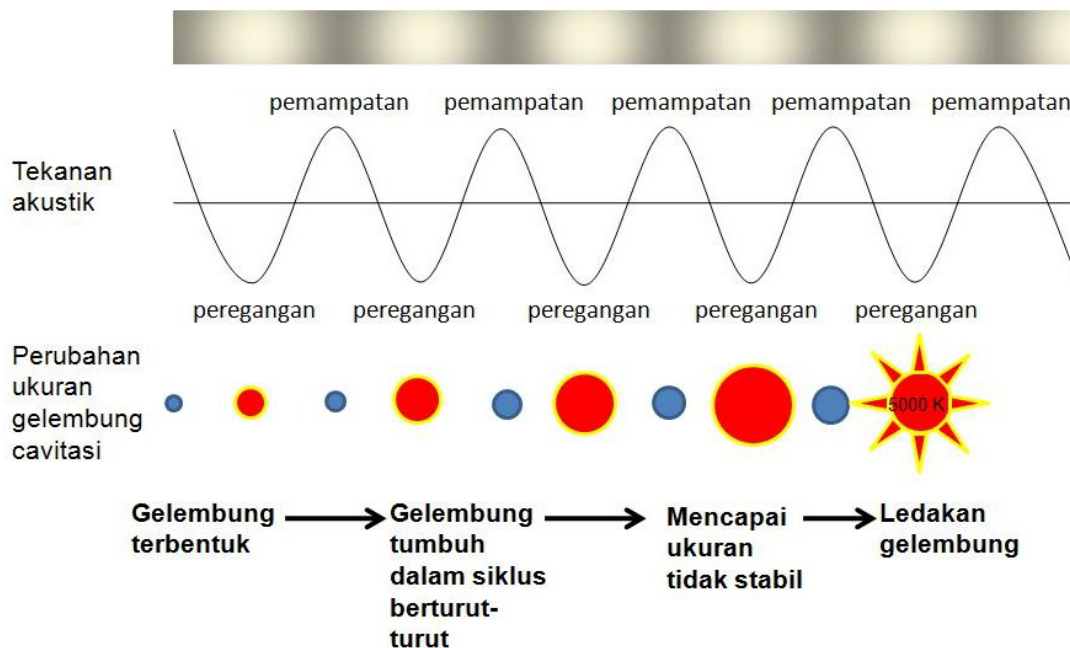


Rajah 2.3 Perubahan cecair sebagai akibat dari gerakan dan tekanan aliran gelombang ultrabunyi.

Gelembung-gelembung yang terbentuk di dalam cecair yang disebabkan oleh aliran dan tekanan daripada gelombang ultrabunyi, dinamakan kavitasi. Fenomena ini didasarkan pada ujikaji yang dilakukan oleh Osborne Reynolds pada tahun 1894. Sedangkan nama *cavitation* diperkenalkan oleh Lord Rayleigh pada tahun 1917. Kavitasi ini biasanya dihasilkan oleh gelembong ultrabunyi yang berada pada frekuensi di antara 20 kHz hingga 2 MHz. Gelembung-gelembung ini bergerak melalui cecair yang disebabkan oleh tekanan dari gelombang mekanikal longitudinal. Gelembung-gelembung ini akan sentiasa mengalami pemampatan dan pengembangan selagi ada getaran yang dikenakan pada cecair. Pemampatan dan peregangan menghasilkan ledakan gelembung kavitasi. Mekanisma pembentukan hingga meledaknya gelembung ditunjukkan dalam rajah 2.4. Rajah ini diadaptasi daripada kertas kerja Avvaru dan rakan-rakan pada tahun 2006. Ledakan gelembong membantu terhasilnya apa yang dipanggil bintik panas (hot spot) ultrabunyi. Fenomena sebegini telah dilaporkan oleh Suslick et al., (1986) melalui eksperimen kesan ultrabunyi terhadap larutan logam alkana karbonil. Mereka melaporkan bahawa bintik panas ultrabunyi dihasilkan mampu mencapai suhu 5000°C untuk larutan karbonil logam. Suhu yang tinggi tersebut dipercayai mampu untuk memecah ikatan antara atom. Ikatan yang pecah dengan mudah diganti dengan ikatan lain. Dalam eksperimen ini mereka memanfaatkan pemecahan tersebut untuk menggantikan ikatan yang pecah tersebut dengan ligan-ligan yang lain.

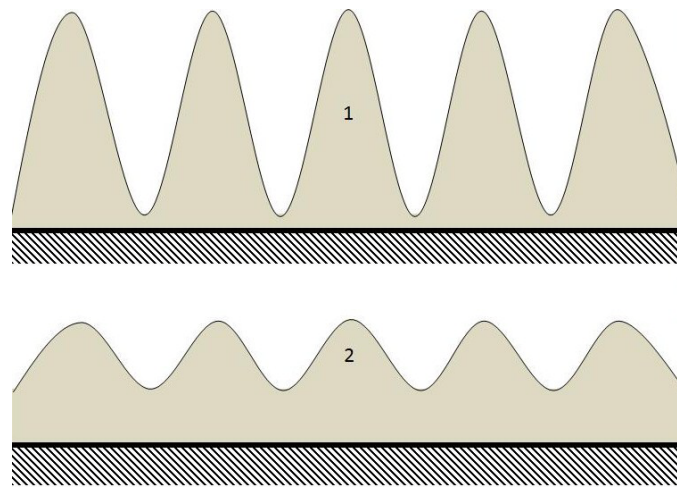
2.2.1 Fenomena gelombang ultrabunyi liang melewati cecair menuju ke udara.

Setelah menghasilkan kavitasasi di dalam cecair, gelombang ultrabunyi bergerak ke permukaan cecair. Gelombang terhasil yang menuju ke interfasa cecair-udara ini dinamakan gelombang rerambut (*capillary wave*). Menurut Taylor gelombang rerambut menghasilkan permukaan cecair yang bergetar (Taylor, 1950). Getaran pada permukaan mempunyai bentuk berbeza-beza bergantung kepada nilai frekuensi gelombang dan kekentalan cecair. Bentuk permukaan getaran pada cecair yang berkentalan tinggi dan rendah ditunjukkan di dalam lakaran seperti alam rajah 2.5.



Rajah 2. 4 Mekanisma gelembung kavitasasi yang terbentuk di dalam cecair (Avvaru et al., 2006).

Jika frekuensi gelombang rerambut melebihi 20 kHz, maka getaran pada permukaan mampu menghasilkan gangguan yang boleh memecahkan permukaan cecair menjadi titisan kecil. Proses ini sering dipanggil pengatoman. Pengaruh gangguan permukaan terhadap kemampuan pengatoman cecair ini telah dilaporkan oleh Lang (1962).

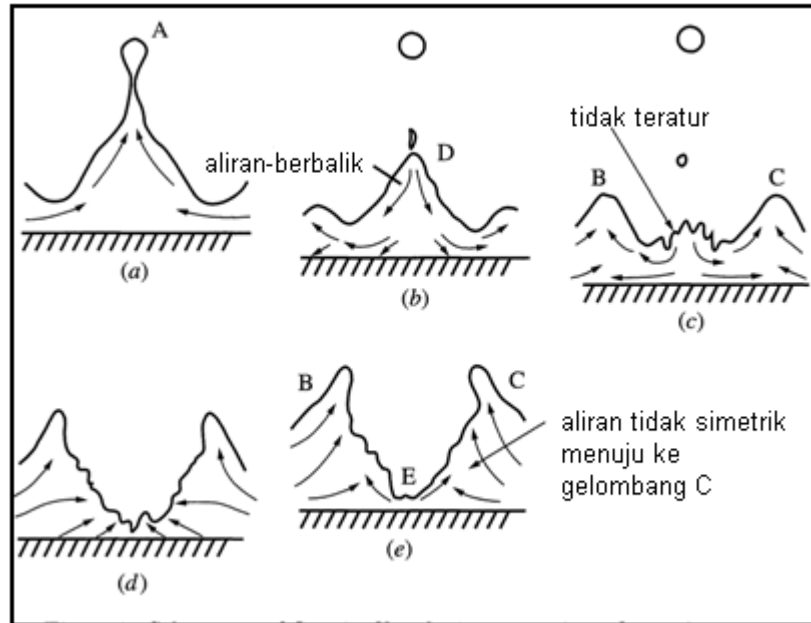


Rajah 2. 5 Lakaran bentuk permukaan apabila gelombang rerambut hadir pada permukaan cecair yang (1) berkentalan rendah, (2) berkentalan tinggi.

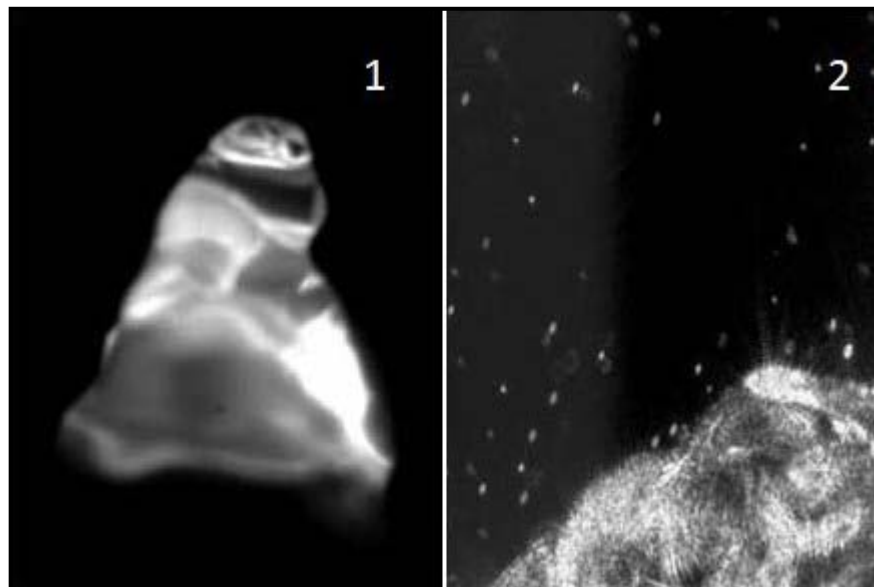
Mekanisma proses pembentukan titisan air gelombang rerambut juga telah dicadangkan baru-baru ini oleh Yule et al. (2000). Proses pembentukan titisan yang mereka cadangkan terbentuk dalam lima langkah seperti yang ditunjukkan dalam rajah 2.6. Mekanisma ini berasaskan aliran cecair yang membentuk gelombang apabila dikenakan gelombang ultrabunyi. Pada rajah 2.6.(a), aliran cecair (anak panah) di dalam

gelombang akan menghasilkan satu bahagian yang terbentuk akibat momentum puncak gelombang (A). Semasa mencapai puncak sehingga terbentuk bahagian A tersebut, tenaga yang mendorong aliran ke atas mencapai maksimum. Oleh itu graviti akan menariknya ke bawah dengan mudah. Pada masa ini, bahagian yang di puncak akan merenggang. Renggang bahagian tersebut akan memisahkan cecair yang pada penghujung gelombang. Aliran balik cecair yang terjadi di rajah 2.6.(b) menghasilkan gelombang D. Aliran tersebut terus bergerak ke dasar pusat gelombang A dan menyebar meninggalkan pusat sehingga terbentuk gelombang B dan C. Di pusat gelombang yang akan ditinggalkan akan terhasillah permukaan yang tidak teratur (beriak). Setelah tenaga pembentukannya gelombang B dan C mencapai titik maksimumnya aliran itu akan berbalik lagi seperti yang diilustrasikan dalam rajah 2.6(d).

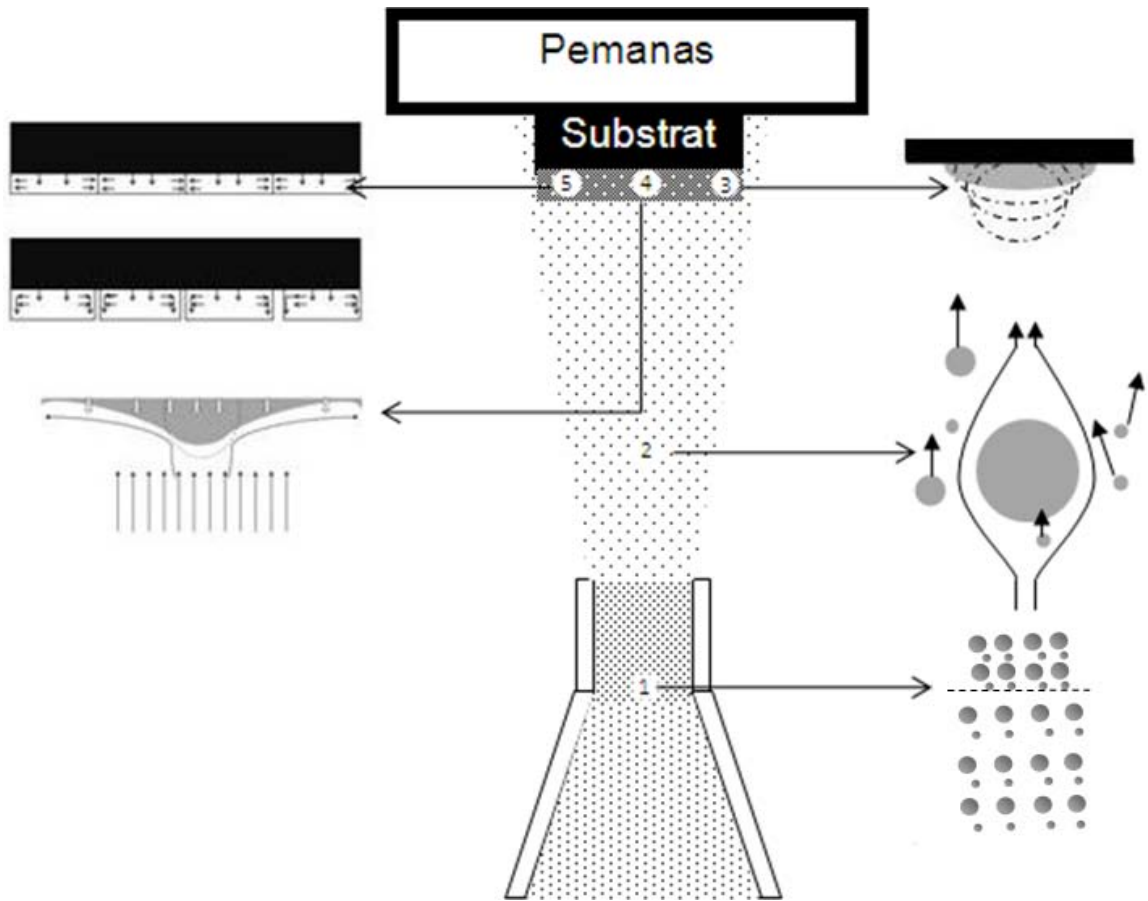
Jika gangguan pada permukaan cecair dihasilkan oleh frekuensi tinggi melebihi 1.6 MHz pengatoman tidak terjadi. Malahan, permukaan akan hanya bergetar dengan getaran yang mendatar. (Barreras, et al., 2002). Hal ini telah dibuktikan oleh mereka di dalam ujikaji pengaruh voltan dalam pembentukan titisan kecil. Permukaan getar yang dicirikan dalam ujikajinya ditunjukkan di dalam bentuk fotograf seperti pada rajah 2.7.(1). Rajah 2.7 pula ialah fotograf yang menunjukkan terjadinya proses pengatoman. Getaran permukaan perlulah tinggi jika kabus perlu dibentuk. Penghasilan kabus digunakan dalam projek ini melalui peranti ultrabunyi.



Rajah 2. 6 Skema aliran cecair masa terjadinya pengatoman (Yole et al. 2000).



Rajah 2. 7 (1) Bentuk kon (kerucut) dari gangguan permukaan di frekuensi tinggi dan (2) terjadinya pengatoman di permukaan gangguan (Barreras et al., 2002).



Rajah 2. 8 Ilustrasi pergerakan kabus ke substrat; (1) kabus di muncung kebuk; (2) pengangkutan di antara muncung dengan substrat; (3) hentaman di permukaan substrat; (4) penyebaran setelah hentaman; (5) pertumbuhan filem.

2.3 Mekanisma perubahan titisan cecair menjadi filem pepejal

Proses penghasilan kabus telah diterangkan pada topik yang sebelum ini. Di sini kaedah pembentukan filem daripada kabus akan dibentangkan. Di dalam proses penguapan melalui PSU, kabus dihasilkan dalam satu kebuk. Pada kebuk ini terdapat muncung untuk aliran keluar kabus. Terdapat juga satu pembukaan untuk gas masuk (inlet). Gas yang dimasukkan akan memberi tekanan kepada kabus untuk bergerak ke muncung dan keluar dari kebuk kabus. Gas pembawa adalah gas yang ringan seperti

argon, nitrogen dan helium. Substrat yang diletakkan berhampiran muncung kebuk adalah tempat di mana filem akan dihasilkan.

Pergerakan kabus semasa keluar dari kebuk hingga diaplikasikan pada substrat boleh diterangkan dalam lima peringkat, seperti yang ditunjukkan rajah 2.8. Lima peringkat ini ialah:

1. Keadaan kabus semasa di muncung kebuk prapenanda [rajah 2.8. (1)]
2. Pergerakan kabus menuju ke permukaan substrat [rajah 2.8. (2)]
3. Hentaman kabus pada permukaan substrat [rajah 2.8. (3)]
4. Penyebaran setelah menghentam [rajah 2.8. (4)]
5. Pembentukan pepejal filem melalui proses penukleusan dan penumbuhan [rajah 2.8. (5)]

Berikut adalah perbincangan berkenaan dengan setiap langkah.

2.3.1. Keadaan kabus semasa di muncung

Kabus yang dihasilkan di kebuk akan dibawa oleh gas pembawa keluar menuju substrat melalui satu muncung. Pada masa melalui muncung, kabus melalui luas kawasan yang berbeza. Ilustrasi aliran kabus digambarkan pada rajah 2.9 di mana \dot{m} adalah kadar aliran jisim kabus; ρ adalah ketumpatan kabus; v adalah halaju kabus; dan A adalah luas kawasan muncung yang dilalui kabus. Berdasarkan hukum keabadian

tenaga, kadar aliran jisim pada semua kawasan yang dilalui kabus dalam muncung adalah sama. Oleh itu, kadar aliran jisim pada dasar \dot{m}_1 dan hujung \dot{m}_2 muncung adalah sama. Perubahan luas kawasan dari dasar ke hujung muncung dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Jika } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad 2.1$$

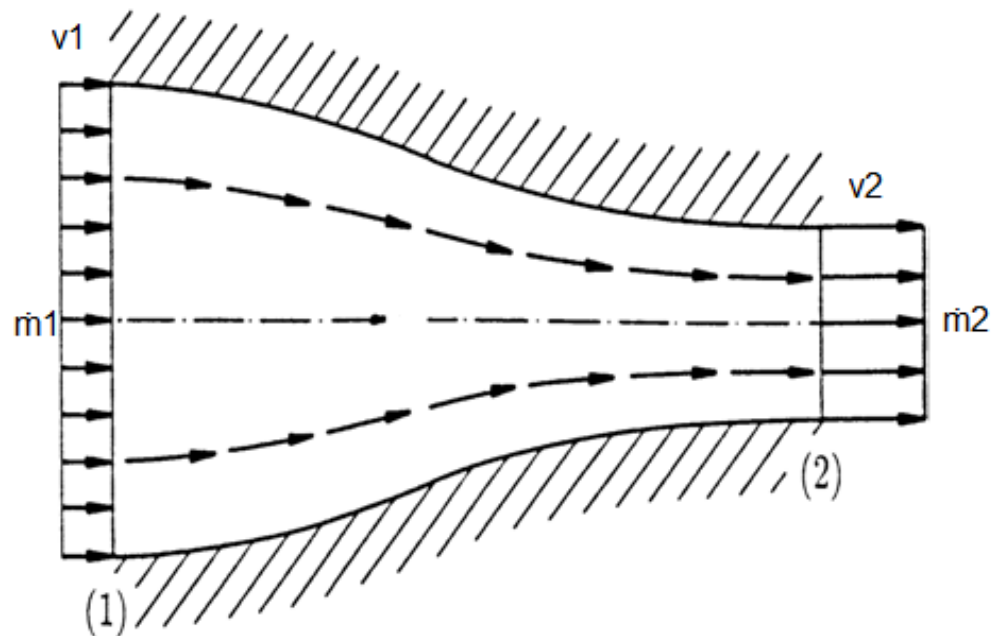
$$\text{maka } \rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \quad 2.2$$

$$\text{jika } A_1 = 4A_2; \quad 2.3$$

$$\text{maka } \rho_1 v_1 4A_2 = \rho_2 v_2 A_2 \quad 2.4$$

$$\rho_1 v_1 4 = \rho_2 v_2 \text{ (Kreith \& Berger, 1999)}$$

Dari rumus (2.1 hingga 2.4) dapat disimpulkan bahawa perubahan luas kawasan di hujung muncung akan mengakibatkan peningkatan ketumpatan ketumpatan antara titisan di dalam kabus dan halaju kabus menjadi 4 kali ganda daripada ketumpatan dan halaju kabus di dasar muncung.



Rajah 2. 9 Aliran bendalir kabus di dalam muncung.

2.3.2 Perjalanan titisan menuju ke permukaan substrat

Kabus yang keluar dari muncung mengandungi titisan-titisan cecair kecil. Titisan ini mempunyai saiz berbeza (Lang, 1962). Jika titisan tersebut dibawa ke atas menuju permukaan, maka ada dua daya yang berlaku di dalam perjalanannya titisan tersebut. Daya tekanan gas pembawa yang berarah ke atas dan daya tarik ke bawah graviti seperti yang ditunjukkan dalam rajah 2.10. Dengan adanya daya graviti memungkinkan hanya titisan yang seragam mungkin akan diendapkan pada substrat. Titisan yang berdimensi besar akan ditarik ke bawah kerana daya graviti lebih kuat dibanding daya tekanan daripada gas pembawa. Besar kecilnya saiz titisan akan memberi kesan pada jisim yang bakal diendapkan kerana daya tarik graviti adalah berkadar terus dengan jisim. Secara

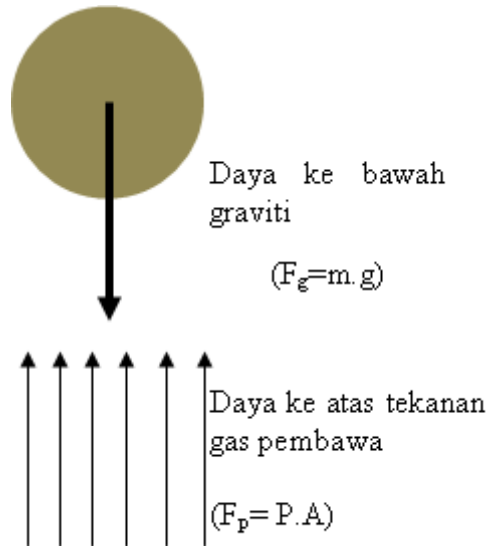
keseluruhannya, semakin besar saiz titisan maka semakin besar pula jisimnya. Oleh itu semakin besar nilai daya tarik graviti terhadap jisim.

Saiz titisan juga memberikan kesan kepada halaju titisan. Saiz yang tidak seragam menyebabkan perbezaan halaju titisan-titisan yang menuju ke substrat. Halaju yang berbeza-beza mempengaruhi jarak antara titisan sama ada titisan-titisan bergerak saling mendekat atau saling menjauh. Gerakan saling mendekat memungkinkan titisan-titisan tersebut saling menyatu diantara satu dengan yang lain kerana kohesi antara cecair yang sama memungkinkan penyatuan Seperti yang diketahui, cecair dengan sifat yang sejenis akan dengan mudah disatukan (cohesion) (Hartland et al., 2004). Penyatuan mengakibatkan titisan-titisan menjadi satu titisan dengan saiz yang lebih besar. Dengan saiz yang meningkat, daya graviti menarik titisan ke bawah juga meningkat. Jika daya graviti lebih besar (yang bertindak ke bawah) daripada daya tekanan gas pembawa (yang bertindak ke atas) maka titisan tidak akan dapat diempakan kerana kebanyakan akan tertarik ke bawah. Oleh itu, halaju titisan perlu dioptimumkan untuk mengelak daripada penyatuan titisan menjadi titisan besar. Perkara ini boleh dikawal dengan mengawal halaju gas pembawa, saiz muncung dan juga jarak antara muncung dan substrat.

2.3.3 Hentaman titisan di permukaan substrat

Pergerakan titisan cecair berakhir pada permukaan substrat. Di permukaan substrat ini, titisan terhentam. Jika titisan cecair diangkut ke atas maka kekuatan titisan yang menghentam substrat dipengaruhi oleh daya tekanan daripada gas pembawa. Daya graviti berperanan mengurangi kekuatan hentaman kerana graviti menarik titisan ke

bawah. Skema hentaman itu diilustrasikan pada rajah 2.8.(4). Proses hentaman cecair selalu diikuti oleh penyebaran pada permukaan.



Rajah 2. 10 Daya yang berlaku dalam pergerakan titisan menuju substrat.

2.2.4 Penyebaran titisan setelah hentaman

Setelah menghentam permukaan substrat, titisan akan menyebar pada permukaan substrat. Kemampuan daya sebar titisan di permukaan substrat dipengaruhi oleh halaju hentaman (tenaga kinetik yang ada pada setiap titisan) dan hubungan diantara titisan dengan substrat iaitu kelekatan larutan pada substrat. Kelekatan bergantung kepada kadar pembasahan substrat oleh titisan yang terhentam (bergantung kepada bahan substrat yang digunakan) dan juga kepada kelikatan larutan. Kesan