

**KAJIAN KESAN KEROSAKAN TOMPOKAN OLEH
MIKROJET**

MOHAMAD NIZAM BIN AYOF

**Tesis ini dikemukakan
sebagai memenuhi syarat penganugerahan
Ijazah Sarjana Sains (Fizik)**

**Fakulti Sains
Universiti Teknologi Malaysia**

MEI, 2001

*Untuk abah, mak dan keluarga tersayang...
Untuk rakan-rakan seperjuangan,
jasa kalian tak akan ku lupakan. Wassalam*

PENGHARGAAN

Assalamualaikum w.b.t.

Penulis ingin merakamkan penghargaan ikhlas dan jutaan terima kasih kepada penyelia projek, Prof. Madya Dr. Noriah Binti Bidin di atas bimbingan, sokongan dan bantuan yang amat berguna sepanjang tempoh penyelidikan projek ini.

Jutaan terima kasih juga ditujukan kepada yang terlibat secara langsung atau tidak langsung khususnya kepada En. Nyan, En. Rashdan dan rakan-rakan seperjuangan; Mohd Hisam, Kamarulzaki, Khairunnadim, Hairurizal, Umikalsom dan Rafidah.

Semoga jasa kalian diberkati Allah Taala. Wassalam.

ABSTRAK

Fenomena hidrodinamik yang sering mendapat perhatian ialah peronggaan. Kewujudan gelembung peronggaan dalam sistem yang menggunakan aliran bendalir telah banyak menimbulkan masalah. Kerosakan, hakisan dan kesan bunyi bising merupakan kesan daripada fenomena ini. Usaha telah giat dijalankan untuk mengatasi masalah ini dan menentukan punca kerosakan tetapi sehingga kini masih belum ada penyelesaian. Satu kemungkinan penyelesaian kepada masalah tersebut dengan menjuruskan kepada satu aspek sahaja iaitu mekanisma mikrojet. Untuk mencapai matlamat ini, maka kajian secara asas dijalankan dengan menggunakan satu gelembung. Laser Q-suis Nd:YAG telah digunakan bagi menjana gelembung peronggaan tunggal berhampiran sempadan pepejal. Teknik metalurgi dan teknik permukaan lembut dengan menggunakan plat logam tulen telah digunakan untuk menganalisis kerosakan yang dijana oleh dedahan gelembung tunggal. Mekanisma kerosakan dikaji dengan memerhatikan aktiviti dinamik gelembung melalui kaedah fotografi kelajuan tinggi. Pengukuran dan pengiraan tekanan serta halaju jet air dibuat berdasarkan keputusan dari rakaman. Halaju jet maksimum diperolehi sebagai 169.5 ms^{-1} dengan tekanan tukul besi air yang sepadan ialah 254.250 MPa. Tekanan sebesar ini sudah lebih dari cukup untuk merosakkan sebarang sempadan yang bertentangan dengannya. Ini diperkukuhkan lagi dengan keputusan pembesaran kerosakan. Walaupun rangka kerosakan ini berbentuk anular, namun di atas cincinnya terdiri daripada tompokan secara individu. Keluasan dan diameter tompokan yang diukur adalah 0.0052 mm^2 dan 0.0815 mm masing-masing. Tidak syak lagi tiada mekanisma lain yang menghasilkan kerosakan yang begitu kecil selain mikrojet. Ini diperkukuhkan lagi dengan keputusan pengukuran dan rakaman yang memberi gambaran bahawa mekanisma yang dominan dalam menjana kerosakan adalah mikrojet.

ABSTRACT

A hydrodynamic phenomenon that normally receives mere attention is cavitation. The presence of cavitation bubble in a system that involves fluid flowing causes a lot of trouble. Damage, erosion and noise is some of the effects of these phenomena. Although, a lot of efforts had been put forward to determine the cause of damage but yet, until now, no solution had been discovered. To throw some light, this work was carried out in order to contribute one possible solution to the problem. This is performed by concentrating only one aspect of damage mechanism that is microjet. Parallel to this objective, we used a fundamental approach by using a single bubble. A Q-switched Nd:YAG laser was employed as a source of a single cavitation bubble near a solid boundary. Metallurgical and soft surface technique was conducted to analyze the damage obtained due to the accumulation of single bubble exposure. The damage mechanism was identified in conjunction with a high-speed photographic technique. The observation results were utilized to determine the impact pressure and velocity of the microjet. The maximum velocity was found as 169.5 ms^{-1} associated with water hammer pressure of 254.250 MPa. Such impressive pressure is enough to damage even hard boundary. This is also consolidating by magnifying the result of cavitation damage. Nevertheless the whole damage pattern is in an annular form, but on top of the ring is fully comprised of individual pits. The average area and diameter are found to be 0.0052 mm^2 and 0.0815 mm respectively. No doubt that no other mechanism poses such smaller size except microjet. The measurement and observation results confirmed that microjet is the dominant mechanism of damage.

KANDUNGAN

BAB	PERKARA	MUKA SURAT
	HALAMAN PENGAKUAN	ii
	HALAMAN DEDIKASI	iii
	HALAMAN PENGHARGAAN	iv
	ABSTRAK	v
	HALAMAN KANDUNGAN	vii
	HALAMAN SENARAI JUDUAL	xi
	HALAMAN SENARAI RAJAH	xii
	HALAMAN SENARAI SIMBOL	xvi
BAB I	PENGENALAN	1
	1.1 Pendahuluan	1
	1.2 Gelembung peronggaan	3
	1.3 Kesan Hentaman Peronggaan	7
	1.4 Penghasilan gelembung peronggaan Tunggal	9
	1.5 Tujuan Dan Skop Kajian	11

BAB II	TEORI	13
2.1	Pendahuluan	13
2.2	Persamaan Asas Dinamik Gelembung Peronggaan	13
2.3	Analisa Rayleigh Terhadap Penguncupan Gelembung Kosong	17
2.4	Kajian Numerikal Penguncupan Gelembung	20
2.5	Mekanisma Yang Menyebabkan Kerosakan Pada Sempadan	22
2.5.1	Gelombang Kejutan	23
2.5.2	Mikrojet	24
2.5.3	Cincin Pusaran	26
2.6	Tekanan Tukul Besi Air	27
2.7	Daya Yang Bertindak Ke Atas Gelembung Peronggaan	28
2.7.1	Daya Bjerknes	28
2.7.2	Impuls Kelvin	28
BAB III	KAEDAH KAJIAN	30
3.1	Pendahuluan	30
3.2	Laser Sebagai Penjana Gelembung	31
3.2.1	Laser Nd:YAG	31
3.3	Sistem Fotografi Halaju Tinggi	33
3.3.1	Laser Pencelup Dan Laser Nitrogen	33
3.3.2	Kaedah Bayangan	35
3.3.3	Tentukuran Pembesaran	36
3.4	Unit Kawalan Picuan Luar	39
3.5	Persediaan Sampel	39
3.6	Kaedah Metalurgikal	41
3.7	Rakaman Tetap	42
3.7.1	Pemprosesan Negatif Filem	43

3.7.2	Proses Mengecap Gambar Foto Hitam Putih (Positif Filem)	43
3.8	Teknik Pengukuran Luas	44
3.9	Penimbangan Sampel	45
3.10	Perisian ' <i>Matrox Inspector 2.1</i> '	46
3.11	Kesan Sifat Fizik Bahan Logam	46
3.12	Kesan Kekasaran Permukaan	48
BAB IV	DINAMIK OSILASI GELEMBUNG PERONGGAAN	50
4.1	Pendahuluan	50
4.2	Dinamik Gelembung Dalam Cecair Bebas	50
4.3	Osilasi Gelembung Berhampiran Sempadan Pepejal	54
4.4	Dinamik Gelembung Peronggaan Pada Jarak Pisah, h Yang Berbeza-beza	57
4.5	Dinamik Gelembung Peronggaan Pada Sempadan Yang Berlainan	61
BAB V	MIKROJET	64
5.1	Pendahuluan	64
5.2	Pengukuran Halaju Mikrojet	66
5.2.1	Halaju Jet Pada Sempadan Yang Berlainan	66
5.2.2	Halaju Mikrojet Berdasarkan Kekasaran Permukaan	73
5.3	Pengukuran Tekanan Jet	75
5.4	Kesimpulan	77

BAB VI	BENTUK KEROSAKAN AKIBAT LASER PERONGGAAN	78
6.1	Pendahuluan	78
6.2	Kesan Kerosakan Laser Peronggaan Pada Plat Indium Tulen	79
6.2.1	Dedahan Gelembung Pada Indium	79
6.2.2	Osilasi Gelembung Tunggal	83
6.2.3	Jumlah Kehilangan Jisim Terhadap Masa	87
6.3	Kesan Kerosakan Laser Peronggaan Pada Plat Aluminium Tulen	89
6.3.1	Osilasi Gelembung Tunggal Pada Jarak Pisah, h 2.0 mm	93
6.4	Analisis Kesan Kerosakan Tompokan	95
6.5	Kesimpulan	103
BAB VII	KESIMPULAN DAN CADANGAN	105
7.1	Kesimpulan	105
7.2	Cadangan	107
	RUJUKAN	109

SENARAI JADUAL

NO. JADUAL	TAJUK	MUKA SURAT
3.1	Sifat-sifat fizik indium dan aluminium	40
3.2	Sifat-sifat bahan logam (Roberts, 1995)	47
3.3	Gred kertas penggosok dan saiz butiran (μm)	48
4.1	Data-data yang diperolehi dari osilasi gelembung pada jarak pisah, h yang berlainan	59
4.2	Jenis-jenis logam dan jejari maksimum bagi osilasi pertama dan kedua	63
5.1	Perbandingan halaju jet ketika gelembung menguncup pada osilasi pertama pada jarak pisah, h yang berlainan pada sempadan permukaan yang berlainan	73
5.2	Hubungan saiz butiran (μm) kertas penggosok dan halaju jet (ms^{-1})	74
5.3	Tekanan tukul besi air pada jarak pisah, $h = 1.4 \text{ mm}$ dan 2.0 mm di atas sempadan permukaan yang berbeza	76
6.1	Hubungan diameter kerosakan pada sempadan indium dengan jarak pisah, h	81

SENARAI RAJAH

NO. RAJAH	TAJUK	MUKA SURAT
1.1	Gambarajah fasa bagi bahan (Hisam, 1998)	4
1.2	Jenis-jenis peronggaan (Lauterborn, 1980)	5
1.3	(a) Skema penguncupan gelembung dari pemfokusan laser (b) Hubungan jejari gelembung dengan masa (c) Hubungan tekanan dengan masa (Young, 1989)	6
1.4	(a) Sekumpulan awan gelembung peronggaan pada keluli tahan karat (Knapp, <i>et. al</i> , 1970) (b) Hakisan pada pam pendesak (c) Hakisan pada dinding konkrit empangan (Tillner, 1995)	8
1.5	(a) Pengembangan gelembung (b) Pengecutan gelembung	10
2.1	Skema proses dinamik pengembangan dan pengecutan gelembung (Young, 1989)	14
2.2	Kes 1 menunjukkan pengecutan gelembung peronggaan yang bersentuhan dengan sempadan pepejal manakala kes 2 jauh dari sempadan pepejal (Plesset dan Chapman, 1971)	21
2.3	Perbandingan pengecutan gelembung hasil daripada kajian eksperimen oleh Lauterborn dan Bolle (1975) (garisan putus-putus) dan kajian teoritikal oleh Plesset dan Chapman (1971) (garisan terus)	23
2.4	Model gelombang kejutan (Knapp, <i>et.al</i> , 1970)	24

2.5	Gambarajah untuk menerangkan pembentukan jet (a) Pemanjangan gelembung dengan kelengkungan yang berbeza bagi dinding gelembung (b) pengecutan gelembung Rayleigh dengan jejari R_{\min} dan R_{\max} (Lauterborn, 1982)	26
3.1	Laser Nd:YAG yang digunakan dalam ujikaji	32
3.2	Pemfokusan laser Nd:YAG untuk menghasilkan gelembung peronggaan di atas sempadan pepejal	32
3.3	Laser pewarna dan laser nitrogen yang bertindak menyinari kawasan dinamik gelembung peronggaan	34
3.4	Susunan kanta objektif dan kanta kamera untuk menghasilkan alur laser terkolimat	34
3.5	Skema penggambaran kaedah bayangan	35
3.6	Imej lubang negatif filem dengan pembesaran 20.6X	37
3.7	Imej skala pembaris dengan pembesaran 19X	38
3.8	Skema keseluruhan set eksperimen	38
3.9	Contoh osilogram pengukuran masa tundaan optik antara laser Nd:YAG dan laser pencilup	40
3.10	Kedudukan gabungan indium dan resin	41
3.11	Fotomikroskop jenis Reichert Polyvar 2MET	42
3.12	Contoh kertas graf yang digunakan untuk mengira keluasan kerosakan	45
3.13	Logam-logam yang digunakan sebagai sempadan pepejal	47
3.14	Susunan sampel logam di atas perspek	48
3.15	Skanogram bagi pelbagai jenis kekasaran permukaan	49
4.1	Kelakuan gelembung peronggaan pada cecair bebas, $R_{\max} = 1.43 \text{ mm (5X)}$	52
4.2	Skema perpindahan gelembung ke sempadan pepejal	53
4.3	Profil hubungan antara diameter gelembung dan masa tundaan	53
4.4	Set gambarajah bayangan gelembung pada sempadan kuprum dengan jarak pisah, $h = 2.0 \text{ mm (4.8X)}$, $R_{\max} = 1.53 \text{ mm}$, $\gamma = 1.31$	56

4.5	Hubungan antara diameter gelembung dengan masa $R_{maks} = 1.53 \text{ mm}$	57
4.6	Osilasi dinamik gelembung pada jarak pisah, h yang berlainan (0.2 - 2.4 mm)	58
4.7	Hubungan antara jarak perpindahan dan jarak pisah, h	60
4.8	Hubungan antara jejari maksimum dan jarak pisah, h	60
4.9	Osilasi gelembung di atas sempadan pepejal yang berlainan	62
5.1	Model pembentukan mikrojet berhampiran sempadan pepejal (Knapp, <i>et. al</i> , 1970)	65
5.2	Skema pengiraan halaju jet cecair (a) masa t_1 dan (b) masa t_2	66
5.3	Aliran jet yang terbentuk pada atas gelembung peronggaan di atas sempadan kuprum dan aluminium pada jarak pisah, $h = 1.4 \text{ mm}$	68
5.4	Aliran jet yang terbentuk pada atas gelembung peronggaan di atas sempadan kuprum dan aluminium pada jarak pisah, $h = 2.0 \text{ mm}$	68
5.5	Hubungan sifat fizikal bahan dengan halaju jet pada jarak pisah, $h = 1.4 \text{ mm}$	69
	(a) Hubungan antara halaju jet dan kekerasan bahan	69
	(b) Hubungan antara halaju jet dan ketumpatan bahan	69
	(c) Hubungan antara halaju jet dan impedens	70
	(d) Hubungan antara halaju jet dan modulus kekenyalan	70
5.6	Hubungan sifat fizikal bahan dengan halaju jet pada jarak pisah, $h = 2.0 \text{ mm}$	71
	(a) Hubungan antara halaju jet dan kekerasan bahan	71
	(b) Hubungan antara halaju jet dan ketumpatan bahan	71
	(c) Hubungan antara halaju jet dan impedens	72
	(d) Hubungan antara halaju jet dan modulus kekenyalan	72
5.7	Hubungan antara saiz butiran dan halaju jet	75
5.8	Hubungan antara saiz butiran dan tekanan tukul besi air	77
6.1	Kesan kerosakan ke atas sampel indium yang disebabkan oleh gelembung peronggaan (14.8X)	80

6.2	Skema bentuk kerosakan yang diperolehi pada; a) Jarak dekat, b) Jarak pertengahan, c) Jarak jauh	81
6.3	Diameter kerosakan melawan jarak pisah, h	82
6.4	Osilasi gelembung peronggaan tunggal pada jarak dekat, pertengahan dan jauh	84
6.5	Profil individu bagi diameter perkembangan gelembung mendatar melawan masa bagi setiap jarak pisah, h	86
6.6	Graf kehilangan jisim berfungsikan masa dedahan dan jarak pisah, h yang berubah-ubah	88
6.7	Plat aluminium; dedahan gelembung pada jarak yang berlainan. Pembesaran 16X	90
6.8	Hubungan antara luas kerosakan dengan jarak pisah, h	91
6.9	Dinamik gelembung peronggaan berhampiran sempadan aluminium pada jarak pisah, $h = 2.0 \text{ mm}$ (12X)	95
6.10	Gambaran kerosakan berbentuk tempokan berfungsikan jarak pisah, h yang berubah-ubah yang telah diproses dengan perisian komputer	96
6.11	Graf menunjukkan profil individu bagi (a) luas minimum tempokan, (b) luas purata tempokan, dan (c) luas maksimum tempokan berdasarkan jarak pisah, h	99
6.12	Hubungan antara luas kerosakan berbentuk tempokan dan jarak pisah antara titik fokus dan sampel aluminium	100
6.13	Graf profil individu bagi (a) diameter minimum tempokan, (b) diameter purata tempokan, dan (c) diameter maksimum tempokan berdasarkan jarak pisah, h	101
6.14	Hubungan antara diameter kerosakan berbentuk tempokan dan jarak pisah titik fokus dan sampel aluminium	102
6.15	Skema pembentukan kesan pandu gelombang akibat hentaman jet yang berulang-ulang	103

SENARAI SIMBOL

A	-	luas permukaan gelembung
c	-	halaju bunyi dalam cecair
ρ	-	ketumpatan cecair
R_{maks}	-	jejari maksimum gelembung
R_{maks1}	-	jejari maksimum gelembung pada osilasi pertama
R_{maks2}	-	jejari maksimum gelembung pada osilasi kedua
R_{min}	-	jejari minimum
R	-	jejari gelembung
\dot{R}	-	halaju pergerakan dinding gelembung
\ddot{R}	-	pecutan dinding gelembung
r	-	jejari dinding cecair
\dot{r}	-	halaju cacair yang tersesar
R_{gk}	-	jejari gelombang kejutan
m	-	jisim gelembung
v	-	halaju gerakan cecair
v_j	-	halaju jet air
V	-	isipadu cecair
V_g	-	isipadu gelembung
V_{maks1}	-	isipadu gelembung maksimum pertama
V_{maks2}	-	isipadu gelembung maksimum kedua
V_{min1}	-	isipadu gelembung minimum pertama
V_{min2}	-	isipadu gelembung minimum kedua
T_k	-	tenaga kinetik
E_k	-	tenaga keupayaan

h	-	jarak pisah antara titik fokus dengan sempadan pepejal
d	-	jarak perpindahan gelembung
$\gamma = h / R_{maks}$	-	pernormalan jarak pisah
f	-	panjang fokus
t_c	-	masa penguncupan
t_{min}	-	masa penguncupan gelembung minimum
t_{maks}	-	masa penguncupan gelembung maksimum
t_{wh}	-	tempoh sentuhan jet air
P_v	-	tekanan wap air
P_g	-	tekanan gas
P_o	-	tekanan sekitaran
P_∞	-	tekanan di infiniti
P	-	tekanan mutlak di titik ujian
P_{wh}	-	tekanan tukul besi air
ϕ	-	halaju keupayaan
I_x	-	impuls Kelvin
MH	-	jumlah masa hayat gelembung Rayleigh
$F(t)$	-	daya yang bertindak ke atas gelembung
Δm	-	jumlah kehilangan jisim
m_1	-	jisim selepas dedahan kepada gelembung
m_o	-	jisim sebelum dedahan kepada gelembung
LDPE	-	Low-density polyethylene

BAB I

PENGENALAN

1.1 Pendahuluan

Gelembung peronggaan merupakan suatu fenomena hidrodinamik dan tidak berlaku di dalam keadaan yang lain seperti di dalam gas atau pepejal (Knapp, *et. al*, 1970). Kewujudannya menyebabkan kerosakan dan hakisan yang menyebabkan kehilangan jisim bahan pada semua sempadan pepejal yang bertentangan terhadapnya.

Banyak penyelidikan telah dibuat untuk memahami fenomena gelembung peronggaan dan pelbagai pemerhatian dan kesimpulan telah dibuat. Pada tahun 1704, pemerhatian mengenai gelembung peronggaan pada cecair yang bertekanan rendah telah dilaporkan oleh Newton (1952). Penemuan awal mengenai fenomena ini didapati secara tidak sengaja daripada pengewapan cecair akibat daripada berlakunya ketidakseimbangan tekanan pada kawasan itu.

Akibat potensi gelembung peronggaan yang bersifat memusnah dan mampu menghasilkan kerosakan, ramai pengkaji telah menjalankan pelbagai penyelidikan untuk memahami lebih lanjut berkenaan fenomena ini. Kesan kerosakan yang dijana oleh peronggaan ini telah menjadi perhatian saintis semenjak tragedi yang berlaku pada kapal perang HMS Daring pada tahun 1893 (Pearsall, 1972). HMS Daring telah gagal mencapai halaju yang diharapkan dan kegagalannya didapati berpunca daripada pembentukan gelembung-gelembung wap pada bilah kipas kapal tersebut.

Beberapa tahun kemudian, kapal yang menggunakan turbin juga didapati menghadapi masalah yang sama.

Kajian awal yang dilakukan oleh Rayleigh (1917) telah mencadangkan bahawa kerosakan yang berlaku adalah akibat daripada proses penguncupan gelembung. Beliau menyatakan kerosakan akibat peronggaan adalah kerana tekanan tinggi yang dijana berhampiran kawasan penguncupan.

Bertitik tolak daripada cadangan ini maka pelbagai usaha telah dijalankan bagi membuktikan kenyataan ini. Antara yang terlibat dalam usaha-usaha ini ialah Sutton (1957) manakala Jones dan Edwards (1960) telah mendapati nilai tekanan maksimum pada pusat penguncupan rongga boleh mencapai 10^4 atm. Denyut-denyut tekanan daripada pusat rongga dipancarkan dalam bentuk gelembung kejutan (Gimmenez, 1982). Sementara itu, Fujikawa dan Akamatsu (1980) telah dapat mengesahkan secara eksperimen bahawa gelombang kejutan telah menunjukkan kesan tegasan apabila berinteraksi dengan bahan fotoelastik. Mereka menyangkal keras terhadap pendapat yang menyatakan bahawa mikrojet yang menyebabkan kerosakan sepertimana yang dicadangkan oleh Kornfeld dan Suvorov (1944).

Shutler dan Mesler (1965) pula telah menggunakan '*spark gap*' untuk menjana gelembung yang didedahkan pada indium. Mereka percaya, mekanisma yang menjadi punca kerosakan anular ialah disebabkan oleh gelembung toroidal. Mutakhir ini, Philipp dan Lauterborn (1997, 1998) telah melaporkan keputusan yang serupa mengenai hakisan yang dijana oleh gelembung tunggal pada plat aluminium.

Konrfeld dan Suvorov (1944) merupakan orang yang pertama menyatakan bahawa mikrojet adalah punca utama yang menyebabkan kerosakan. Kenyataan ini cuba dibuktikan dengan kerja-kerja secara praktik oleh Benjamin dan Ellis (1966). Kesan-kesan tompokan yang terjadi dibandingkan dengan saiz mikrojet yang terbentuk, tetapi menunjukkan hasil yang berbeza. Tomita dan Shima (1986) telah membuat kajian secara eksperimen dan berpendapat cecair mikrojet tidak mendatangkan kesan apa-apa pada bahan fotoelastik, tetapi sebaliknya gelombang kejutan yang dihasilkan ketika gelembung peronggaan menguncup menunjukkan tekanan pada bahan tersebut.

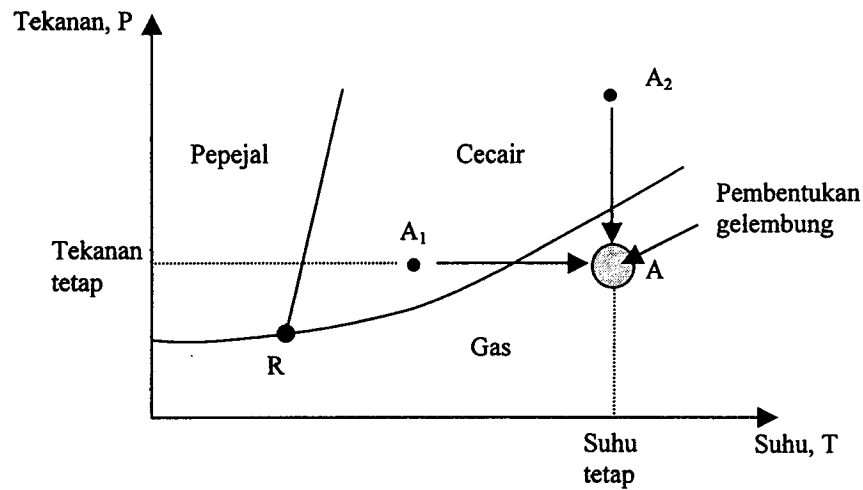
Teori pertama tentang penguncupan rongga telah diperolehi secara numerikal oleh Plesset dan Chapman (1971). Kemudian Lauterborn dan Bolle (1975) telah membuktikannya secara praktikal.

Walaupun pelbagai usaha telah dijalankan, namun sehingga ke saat ini belum ada keputusan yang muktamad dapat dicapai dalam menentukan sebab musabab sebenar dan tiada tindakan langsung yang dapat diambil selain daripada melambatkan tempoh kerosakan dengan menambahkan kekerasan material yang digunakan. Selain daripada itu, satu lapisan pelapis telah digunakan untuk menghalang serangan fenomena ini. Chahine (1977), Gibson (1968) dan Blake, *et. al* (1986) telah menjalankan penyelidikan berangka dan bersetuju bahawa gelembung akan menjauhi sempadan yang berimpeden rendah. Ini telah dibuktikan dengan kajian yang dijalankan oleh Khairunnadim (2001) yang menggunakan lapisan dari polietelin ketumpatan rendah (LDPE) sebagai bahan pelapis.

1.2 Gelembung Peronggaan

Secara amnya terdapat dua jenis gelembung. Gelembung-gelembung ini dapat dibezakan dari segi pembentukannya. Jenis yang pertama dinamakan sebagai gelembung udara yang mengandungi gas, seperti oksigen dan hidrogen. Gelembung ini biasa terjadi apabila suhu cecair bertambah di bawah tekanan yang tetap seperti proses pendidihan air. Jenis pertama ini mempunyai sifat terus membesar. Pembesarannya akan menyebabkan daya tujahan menolaknya bergerak sehingga timbul pada permukaan air. Ia tidak mempunyai sifat memusnah.

Rajah 1.1 menunjukkan perubahan fasa bahan di bawah pengaruh tekanan dan suhu. Air akan mengalami proses pengewapan iaitu penukaran dari fasa cecair kepada fasa gas dalam dua keadaan. Pertama, perubahan keadaan berlaku dengan kenaikan suhu pada tekanan yang tetap iaitu laluan $A_1 - A$. Gelembung gas terbentuk pada tahap perubahan ini (Brennen, 1995).



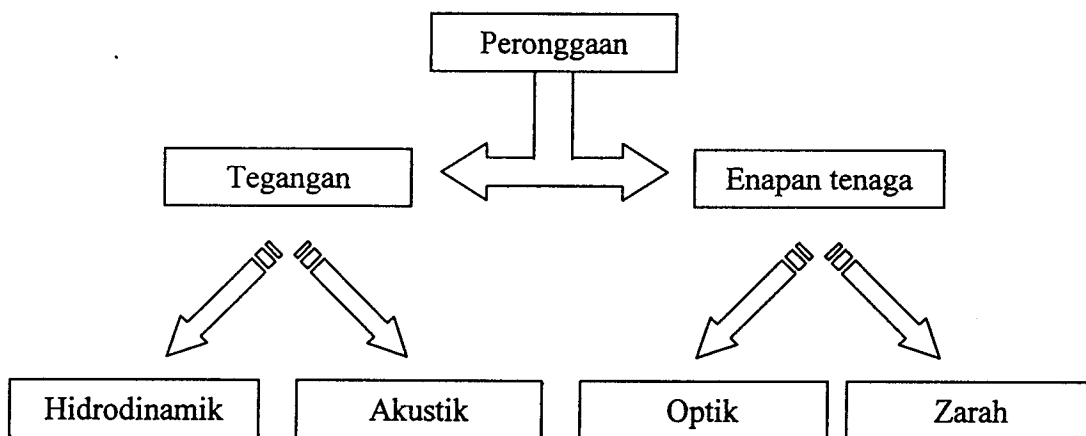
Rajah 1.1: Gambarajah fasa bagi bahan (Hisam, 1998)

Lalaun $A_2 - A$ pula menunjukkan air akan mengalami perubahan tekanan yang bersuhu tetap. Di sini penurunan tekanan berlaku sehingga tidak melebihi tekanan wap tepu dan seterusnya cecair tidak dapat bertahan dan akan menghasilkan gelembung peronggaan yang mempunyai sifat eksplosif atau memusnah kerana ia mempunyai keupayaan untuk membesar, mengecut, menguncup dan mengembang semula sehingga berlaku beberapa kali osilasi sebelum gelembung ini meresap kembali ke dalam air dengan tenaga gelembung semakin berkurangan. Jenis yang kedua inilah yang dinamakan sebagai gelembung peronggaan.

Sementara itu Lauterborn (1980) menjelaskan terdapat empat jenis peronggaan yang bergantung kepada teknik pembentukannya. Peronggaan hidrodinamik dihasilkan oleh perbezaan tekanan dalam cecair yang mengalir. Peronggaan akustik dihasilkan oleh gelombang bunyi dalam cecair. Peronggaan optik dihasilkan oleh foton cahaya bertenaga tinggi yang mengalami keruntuhan dalam cecair. Peronggaan zarah dihasilkan oleh sebarang jenis zarah asas seperti proton yang mengalami keruntuhan dalam kebuk cecair.

Lauterborn (1980) menjelaskan bahawa peronggaan hidrodinamik dan akustik disebabkan oleh tegangan dalam cecair. Peronggaan optik dan zarah boleh dihasilkan dengan enapan tenaga setempat. Rajah 1.2 menunjukkan jenis-jenis peronggaan yang diberikan oleh Lauterborn (1980).

Peronggaan optik boleh dijanakan dengan memfokuskan laser Q-suis di dalam cecair. Runtuhan laser ini berlaku bersama-sama dengan pembentukan plasma yang mempunyai suhu dan tekanan yang amat tinggi. Berikutan fenomena ini, air akan bertukar membentuk wap dengan serta merta. Sementara itu tekanan di luar gelembung menjadi rendah berikutan gelombang kejutan yang wujud bersama-sama dengan kejadian plasma dan merambat keluar dengan halaju bunyi dalam air. Perbezaan tekanan ini akan menyebabkan gelembung berpeluang untuk mengembang ke jejari maksimum sebelum mengecut semula. Gelembung akan mengembang semula sehingga beberapa kali osilasi.

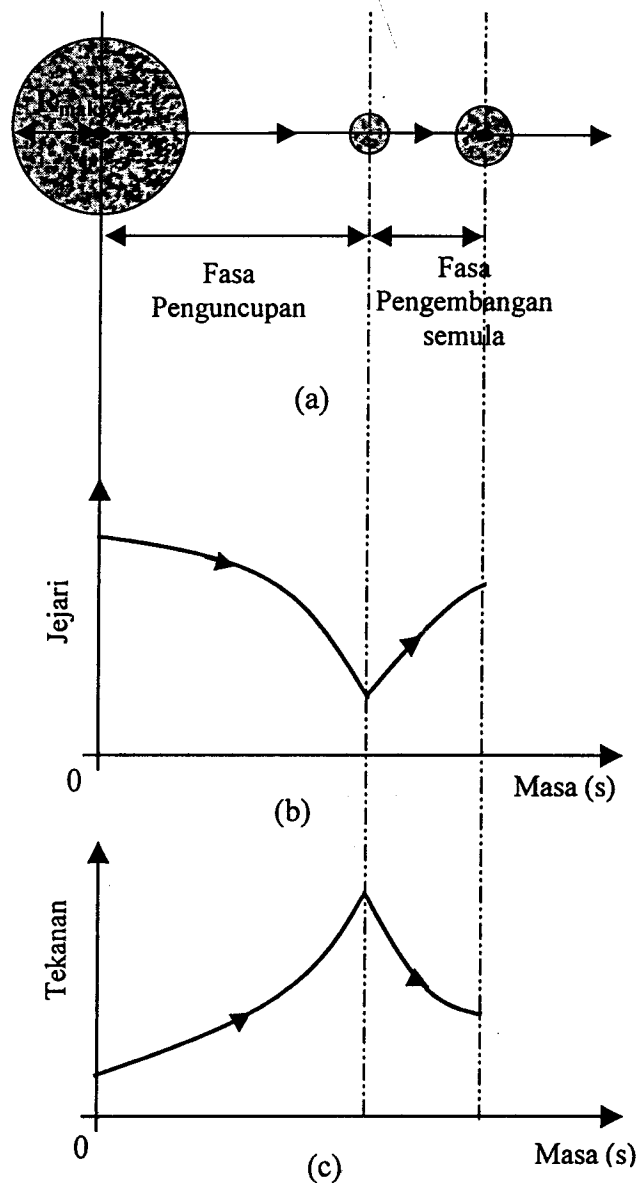


Rajah 1.2: Jenis-jenis peronggaan (Lauterborn, 1980)

Tenaga yang menjanakan gelembung didapati mempengaruhi saiz gelembung. Lebih besar tenaga lebih besar saiz gelembung. Masa penguncupan didapati lebih panjang dengan saiz gelembung yang besar (Johnson dan Hsieh, 1966). Johnson dan Hsieh (1966) juga menyatakan proses pengembangan dan penguncupan berlaku lebih banyak apabila tenaga yang lebih besar diberikan.

Rajah 1.3 (a) pula menunjukkan penguncupan gelembung peronggaan daripada pemfokusan laser. Rajah 1.3 (b) menunjukkan hubungan jejari gelembung dengan masa. Gelembung akan mencapai jejari maksimum sebelum mengecut dan seterusnya menguncup kepada jejari minimum. Gelembung akan mengembang semula untuk beberapa osilasi sehingga tenaga keupayaannya habis.

Rajah 1.3 (c) pula menunjukkan hubungan tekanan di dalam gelembung dengan masa penguncupan gelembung. Apabila laser difokuskan, maka tekanan di dalam gelembung meningkat dengan cepat. Tekanan yang tinggi ini akan menyebabkan gelembung mengembang dan mencapai jejari maksimum, R_{maks} dan pada ketika ini tekanan di dalam gelembung adalah minimum. Seterusnya gelembung akan berosilasi beberapa kali sehingga tenaganya habis.



Rajah 1.3: (a) Skema penguncupan gelembung dari pemfokusan laser (b) Hubungan jejari gelembung dengan masa (c) Hubungan tekanan dengan masa (Young, 1989)

1.3 Kesan Hentaman Peronggaan

Gelembung peronggaan yang bersifat memusnah akan merosakkan dan menghakis sebarang bahan yang bertentangan dengannya. Menurut Tillner (1995) kesan akibat peronggaan terlalu kompleks dan bergantung kepada banyak faktor. Antaranya, gelembung peronggaan akan menyebabkan hakisan pada bahan. Selain itu, penguncupan gelembung akan menghasilkan serangan mekanikal kepada bahan. Proses hakisan semulajadi dikhuatiri akan berubah sifat dengan terhasilnya gelembung peronggaan. Tillner juga menyatakan peronggaan juga dibimbangi akan mempengaruhi sifat mekanikal bahan bertentangan.

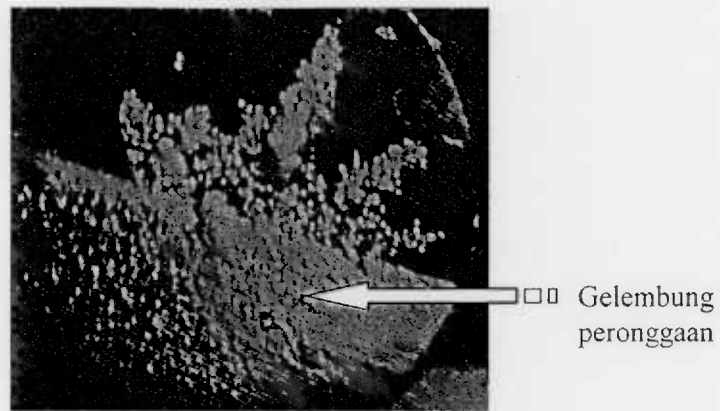
Fenomena ini sering berlaku pada sistem hidraulik, empangan, sistem turbin, pam air, dan bilah kipas kapal. Rajah 1.4 (a) menunjukkan sekumpulan awan gelembung peronggaan menutupi keluli tahan karat (Knapp, *et. al*, 1970), manakala Rajah 1.4 (b) dan (c) menunjukkan kesan hakisan yang disebabkan oleh fenomena peronggaan ini pada pam pendesak dan empangan (Tillner, 1995).

Kesan bunyi bising akibat proses penguncupan gelembung peronggaan juga mendatangkan masalah, khususnya dalam bidang ketenteraan. Kapal selam mudah dikesan musuh akibat daripada bunyi bising yang dihasilkan oleh kipas kapal selam. (Pearsall, 1972).

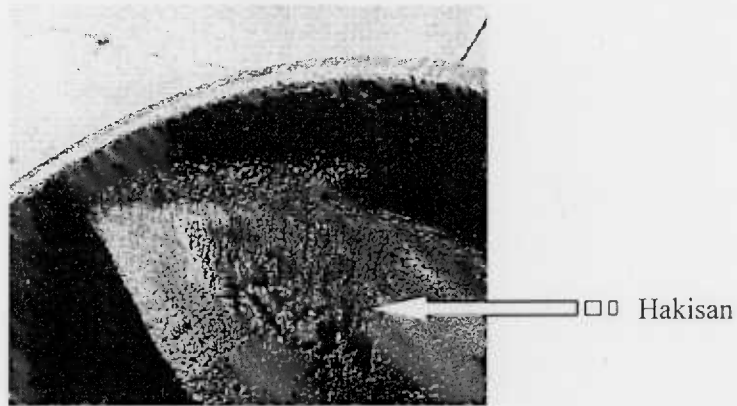
Walaupun gelembung peronggaan ini bersifat memusnah, tetapi ia juga memberi banyak manfaat dalam kehidupan kita. Pada hari ini, penghasilan gelembung peronggaan oleh kaedah ultrasonik telah dieksploitasikan secara meluas. Sesetengah pihak menggunakan kriteria peronggaan dalam pencucian kawasan sulit dan berlumut. Pencucian itu dilaksanakan menggunakan konsep pancutan jet air. Konsep yang sama digunakan untuk memecahkan batu di kawasan perlombongan. Dalam bidang perindustrian pula, peronggaan digunakan dalam penghasilan roti, membuat permainan kanak-kanak serta penyediaan arak (Ramalah, 1997).

Seterusnya gelembung peronggaan ini digunakan oleh doktor gigi untuk membersihkan gigi melalui jet air yang berkelajuan tinggi pada kawasan-kawasan yang sulit. Dalam bidang perubatan, laser digunakan sebagai alat pembedahan mata

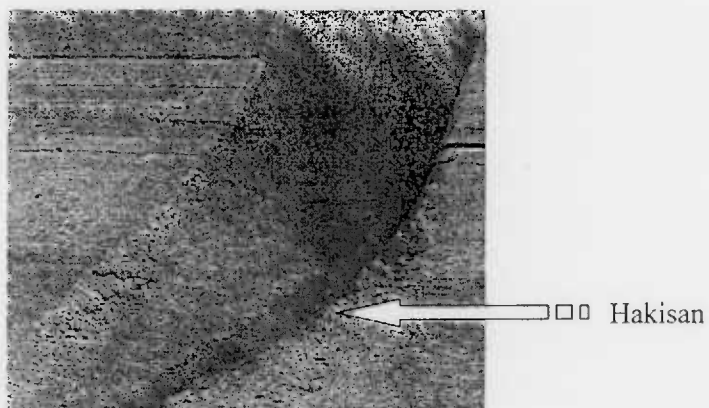
dengan penghasilan gelombang kejutan akibat pemfokusan laser (Aron-Rosa, *et. al*, 1980).



(a)



(b)



(c)

Rajah 1.4: (a) Sekumpulan awan gelembung peronggaan pada keluli tahan karat (Knapp, *et. al*, 1970), (b) Hakisan pada pam pendesak dan (c) Hakisan pada dinding konkrit empangan (Tillner, 1995)

1.4 Penghasilan Gelembung Peronggaan Tunggal

Dalam keadaan sebenar, gelembung peronggaan wujud dalam keadaan berkumpul dan jumlah gelembung peronggaan yang wujud mencapai bilangan jutaan. Fenomena ini telah menyebabkan berlakunya hakisan dan kerosakan pada permukaan sempadan pepejal.

Ramai penyelidik telah menjalankan kajian secara intensif mengenai kewujudan gelembung peronggaan yang menjadi punca kerosakan pada permukaan logam tersebut. Namun, dengan kewujudan sekumpulan gelembung, sukar ditentukan fenomena fizikal yang menjadi punca kerosakan. Oleh kerana timbulnya kesukaran dalam melaksanakan kajian dalam situasi sebenar, maka wajarlah sekiranya kajian asas dengan mengkaji hanya satu gelembung peronggaan tunggal dilakukan.

Kajian dengan menggunakan laser sebagai penjana gelembung merupakan teknik terbaik bagi menghasilkan satu gelembung tunggal. Gelembung peronggaan tunggal dihasilkan melalui pemfokusan alur laser ke dalam cecair. Teknik ini akan lebih memudahkan dalam menentukan mekanisma yang akan menyebabkan kerosakan dan bentuk kerosakan yang dijanakan pada sempadan pepejal.

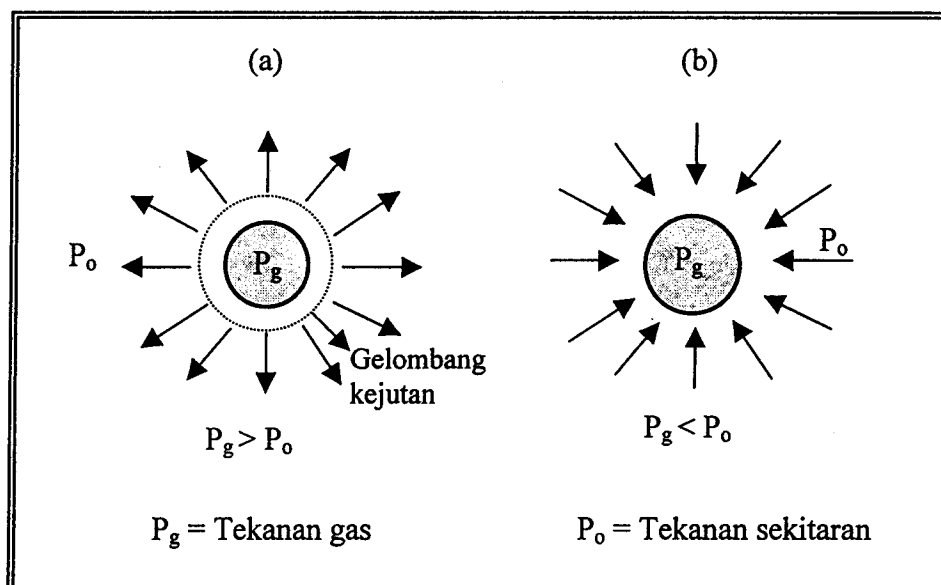
Alur laser yang difokuskan dalam cecair akan membentuk plasma yang mempunyai suhu dan tekanan yang cukup tinggi dan mampu menukarkan fasa cecair kepada fasa wap dengan serta-merta. Gelembung yang dihasilkan berbentuk sfera dan bebas daripada perubahan mekanikal (Hentschel dan Lauterborn, 1982).

Semasa laser difokuskan ke dalam air, runtuh laser berlaku pada titik fokus. Perubahan tekanan secara tiba-tiba di titik fokus menyebabkan gelombang kejutan terjana (Ward dan Emmony, 1990). Gelombang kejutan ini akan merambat keluar dengan halaju supersonik pada peringkat awal diikuti dengan halaju bunyi pada peringkat terakhir. Ketika gelombang kejutan merambat keluar, kawasan di sekitar titik fokus yang ditinggalkan mengalami tekanan rendah. Kejadian ini bersesuaian dengan Prinsip Bernoulli di mana apabila halaju gelombang kejutan pada satu titik adalah tinggi, maka tekanan pada titik tersebut adalah rendah.

Tekanan gas dan wap dalam gelembung lebih tinggi daripada tekanan sekitaran cecair (Rajah 1.5 (a)). Proses pengembangan gelembung akan berterusan sehingga ke satu tahap maksimum.

Tekanan di sekitar gelembung peronggaan kembali normal setelah gelombang kejutan beredar jauh dari titik pemfokusan laser. Ini menyebabkan tekanan di dalam gelembung menjadi lebih rendah daripada tekanan di luar gelembung. Perbezaan tekanan ini mengakibatkan gelembung peronggaan mengecut serta termampat ke isipadu paling minimum, seperti ditunjukkan dalam Rajah 1.5 (b).

Gelembung yang menguncup untuk kali kedua ini akan menjanakan gelombang kejutan dan sekali lagi gelembung akan mengalami proses pengembangan secara sfera. Gelombang kejutan yang terhasil pada peringkat kedua menunjukkan bahawa sebahagian tenaga keupayaan ditukar kepada tenaga akustik (Ward dan Emmony, 1990). Sebahagian lagi tenaga yang lain akan hilang melalui proses pemindahan haba. Oleh itu saiz maksimum gelembung pada peringkat pengembangan kedua ini adalah lebih kecil berbanding yang pertama. Keseluruhan proses osilasi akan berulang sehingga tenaga keupayaan hilang dalam cecair dan keadaan stabil tercapai.



Rajah 1.5: (a) Pengembangan gelembung (b) Pengecutan gelembung

1.5 Tujuan Dan Skop Kajian

Mekanisma jet air merupakan salah satu fenomena yang dijangka bertanggungjawab terhadap kesan kerosakan tompokan. Oleh yang demikian tujuan kajian ini ialah untuk menumpukan sama ada mekanisma ini benar-benar menyumbang kerosakan pada sempadan permukaan lembut. Ini dijalankan dengan menggunakan logam tulen indium dan aluminium.

Bab I akan membincangkan fenomena peronggaan secara umum dan kesan kerosakan akibat serangan peronggaan. Bab II pula akan membincangkan teori berkenaan gelembung peronggaan dan mekanisma jet air. Kaedah eksperimen yang digunakan untuk keseluruhan kajian ini diterangkan dalam Bab III. Laser Nd:YAG digunakan untuk menjana gelembung peronggaan manakala osilasi dinamik gelembung pula diperhatikan dengan kaedah fotografi kelajuan tinggi. Kaedah metalurgikal digunakan untuk menganalisa sampel sempadan pepejal yang telah didedahkan kepada gelembung peronggaan.

Sementara itu, Bab IV pula akan membincangkan hasil ujikaji iaitu dinamik gelembung peronggaan. Ia meliputi kajian dinamik peronggaan tanpa kehadiran sempadan pepejal dan dengan sempadan pepejal. Beberapa sempadan yang berlainan digunakan seperti aluminium, emas, kuprum dan indium.

Bab V pula merupakan kajian berkenaan mikrojet. Kesan mekanisma ini ditentukan melalui halaju jet dan tekanan tukul besi air. Pengaruh sifat fizikal sempadan pepejal dan kesan kekasaran permukaan akan turut dibincangkan.

Keputusan kajian mengenai kesan kerosakan ke atas sampel indium dan aluminium pula dibincangkan di dalam Bab VI. Kesan kerosakan tompokan dikaji berdasarkan jarak pisah antara pusat pemfokusan laser dan sempadan pepejal, h . Gambar-gambar kesan kerosakan menggunakan teknik metalurgikal diproses untuk mengira bilangan tompokan kecil dan luasnya. Kadar kehilangan jisim sempadan juga dikira.

Bab VII mengandung kesimpulan mengenai keseluruhan kajian yang dijalankan. Seterusnya tesis ini diakhiri dengan memberikan beberapa cadangan untuk kajian yang akan datang.

SENARAI RUJUKAN

- Aron-Rosa, D., Aron, J., Griesemann, M., dan Thyzel, R. (1980). "Use of the Neodymium-YAG laser to open the posterior capsule after lens implant surgery: a preliminary report.", *J. Am. Intra-Ocular Implant Soc.*, Vol. 6, 352-360.
- Askar'yan, G. A, Prokhorov, A.M. dan Chanturiya, G.F (1963). " The effect of a laser beam in a liquid." *Sov. Phys: JETP*, 17, 1463 – 1465.
- Batchelor, G.K. (1967). "An introduction to fluid dynamics." London: Cambridge University Press, 156.
- Benjamin, T. B. dan Ellis, A.T. (1966). " The collapse of cavitation bubbles and the pressure thereby solid boundaries." *Phil. Trans. R. Soc. London.* , A260, 221-240.
- Besant, W.H. (1959). "Hydrostatics and Hydrodynamics.", Cambridge: Deighton Bell.
- Blake, J.R., Taib, B.B. dan Doherty, G. (1986)." Transient cavities near boundaries. Part. I :Rigid boundary.", *J. Fluid Mech.*,170, 479-497.
- Blake, W.K. (1986). "Mech. Of flow-induced sound and vibration.", Academic Press, 11, 427.
- Brennen, C.E. (1995). "Cavitation and bubble dynamics." New York: Oxford University Press Inc.

- Chahine, G.L. (1977). "Interaction between an oscillating bubble and a free surface."
J.Fluids Eng. 99, 709-716.
- Chahine, G.L. dan Genoux, Ph.F. (1983). "Collapse of a cavitation vortex ring."
Trans. ASME J. of Fluids Engineering. 105(4) ; 400-405.
- Ebeling, K.J. (1978). "Acustica.", 40, 229.
- Ebeling, K.J. (1980). "Cavitation and inhomogeneities in ubderwater acoustic."
Berlin, Springer, 35.
- Fujikawa, S dan Akamatsu, T. (1980). "Effects of the non-equilibrium condensation
of vapour on the pressure wave produced by the collapse of a bubble in a
liquid.", J. Fluid. Mech. , 97, 481-512.
- Gibson, D.C. (1968). "Cavitation adjacent to plane boundaries." Proc. Third
Australasian, Conf. on Hydraulic & Fluid Mechanics. p.p 210-214.
- Gimmenez, G. (1982). "The simultaneous study of light emission and shock waves
produced by cavitation bubbles." J. Acous. Soc. Am., 71(4), 839-846.
- Hentschel, W. dan Lauterborn, W. (1982). "Acoustic emission of single laser
produced cavitation bubbles and their dynamics." Applied Scientific Research
38, 225-230.
- Hickling, R. dan Plesset, M.S. (1964). "Collapse and rebound of a spherical bubbles
in water." Physic Fluid, Vol. 7, 7-14.
- Hisam, M.H. (1998). "Kesan kerosakan bentuk anulus oleh gelembung peronggaan."
Universiti Teknologi Malaysia: Tesis Sarjana.
- Johnson, V.E dan Hsieh, T. (1966). Proc. Sixth Symp. On Naval Hydro Dynamic,
Washington, D.C., 1.

- Jones, I.R. dan Edwards, D.H. (1960). "An experimental study of the forces generated by the collapse of transient cavities in water.", *J. Fluid Mech.*, Vol 7:596-609.
- Kamarulzaki, M. (2000). "Pencirian gelembung peronggaan dan kajian kerosakan oleh mekanisma gelombang kejutan." Universiti Teknologi Malaysia: Tesis Sarjana.
- Khairunnadim, A.S. (2001). "Mengkaji dinamik penolakan gelembung yang dijana oleh laser infra-merah". Universiti Teknologi Malaysia: Tesis Sarjana.
- Knapp, R.T. dan Hollander, A. (1948). *J. Basic Eng. Trans. ASME Ser D* 70, 419, 1948.
- Knapp, R.T (1955). "Recent investigation of the mechanics of cavitation and cavitation damage." *Transe. ASME J. of Basic Engineering.* 77 ;1045-1254.
- Knapp, R.T. Daily, J.W. dan Hammitt, F.G. (1970). "Cavitation." New York: Mc.Graw-Hill Inc.
- Konrfeld, M. dan Suvorov, L. (1944). "On the destruction action of cavitation.", *J. Applied Physics*, 15; 495-506
- Kristensen, J.K., Hanson, I. dan Morch, K.A. (1977). "A simple model for cavitation erosion of metals." *J. of Applied Physics*, 11; 899 – 912
- Lamb, H. (1932). "Hydrodynamics" 6th ed. Cambridge University Press, 51.
- Lauterborn, W. (1974). "Cavitation due to laser light.", *Acoustic.*, 31, 51-78.
- Lauterborn, W. dan Bolle, H. (1975). "Experimental investigation of cavitation bubble collapse in the neighborhood of a solid boundary." *J. Fluid Mechanics*, 72, 391 - 399.

- Lauterborn, W (1980). "Cavitation and inhomogeneties in underwater acoustics."
Berlin: Springer-Verlag.
- Lauterborn, W. (1982). "Cavitation bubbles dynamics new tools for intricate problem." *J. App. Scientific Res.*, 38, 165-178.
- Minneart, M. (1963). "Musical air bubbles and the sound of running water." *Phil Mag.*, Vol. 16, 235-248.
- Naude, C.F. dan Ellis, A. T. (1961). " On the mechanism of cavitation damage by non-hemispherical Cavities collapsing in contact with a solid boundary. " *J. of Basic Engineering.* 83(4). 648-656.
- Neppiras, E.A. (1969). *J. Acoust. Soc. Am.* 45, 587.
- Neppiras, E.A dan Fill, E.E. (1969). *J. Acoust. Soc. Am.*, 46, 1264.
- Newton, I (1952). "Optiks." New York : Dover Publication. 207.
- Noltingk, B.E., dan Neppiras, E.A. (1950). "Cavitation produced by ultrasonics, Theoretical condition for the onset of cavitation.", *Proc. Phys. Soc.*, Vol. 64, London: 1032-1037.
- Noriah, B. (1995). "Studies on laser induced cavitation erosion and mechanism of cavitation damage." *Universiti Teknologi Malaysia: Tesis PhD.*
- Pearsall, I.S. (1972). "Cavitation." London: Mills and Boon.
- Philipp, A., Ohl, C.D. dan Lauterborn, W. (1995). "Single bubble erosion on a solid surface." *Proceeding International Symposium on Cavitaion. France. May 1995.*
- Philipp, A. dan Lauterborn, W. (1997). "Damage of solid surface by single laser-produced cavitation bubble.", *Acustica*, 83: 223-227.

- Philipp, A. dan Lauterborn, W. (1998). "Cavitation erosion by single laser-produced bubbles." *J. Fluid Mech.* 361: 75-116.
- Phillipp, A., Ohl, C.D., Lindau, O., dan Lauterborn, W. (1998). "Details of symmetric bubble collapse.", *Proc. 3rd Int. Symp. On Cavitation. Grenoble, France*: 39-44.
- Plesset, M.S. (1949). "Dynamics of cavitation bubbles.", *J. appl. Mech.*, Vol. 16, 277-282.
- Plesset, M.S. dan Chapman, R.B. (1971). "Collapse of an initially spherical vapor cavity in the neighborhood of a solid boundary." *J. Fluid Mechanics*, 47. 283 – 290.
- Ramalah M. (1997), "Kajian Laser Menghasilkan Rongga Pada Sempadan Pepejal-Air," *Universiti Teknologi Malaysia: Tesis Sarjana Muda*.
- Rattray, M. (1951). Ph.D. thesis, California Institute of Technology.
- Rayleigh, J.W. (1917). "On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity." *Philos. Mag.* 343, 94-98.
- Robert, R. (1995). "CRC Handbook of Chemistry and Physics Constant." 70 th. Edition Florida : Boca Raton.
- Shutler, N.D. dan Mesler, R.B. (1965). "A photographic study of the Dynamics and Damages capabilities of bubble collapsing near solid boundaries." *J. of Basic Engineering.* 87(2). 511-517.
- Sutton, G.M. (1957). "A photoelastic study of strain waves caused by cavitation.", *J. Appl. Mech.*, Vol. 24, 340-346.

- Tillner, W. (1995). "The avoidance of Cavitation Damage." London: Mechanical Engineering Publications Limited.
- Tomita, Y. dan Shima, A. (1986). "Mechanism of impulsive pressure generation and damage pit formation by bubbles collapse.", J. Fluid Mech., Vol. 169, 535-564.
- Vogel, A. dan Lauterborn, W. (1988). "Acoustic transient generation by laser produced cavitation bubbles near solid boundaries.", J. Acoustic Soc., 84(2), 719-731
- Vogel, A., Lauterborn, W. dan Timm, R. (1989). "Optical and acoustic investigations of the dynamics of laser produced cavitation bubbles near a solid boundary.", J. Fluid Mech., 206, 299-338.
- Ward, B. dan Emmony, D.C. (1990). "The energies and pressures of acoustic transients associated with optical cavitation in water.", J. Modern Optics, Vol. 37(4), 803-811.
- Young, F.R. (1989). "Cavitation." London: McGraw-Hill.