



KAVITASI

DI DASAR SALURAN CURAM



Dr. Eng. Yeri Sutopo, M.T., M.Pd.

KATA PENGANTAR

Kavitasi Di Dasar Saluran Curam merupakan buku teks yang dimaksudkan sebagai alat bantu pembelajaran serta referensi bagi mahasiswa, praktisi, serta pengambil keputusan yang terkait dengan bidang saluran curam. Buku ini disusun untuk membantu pemahaman pada pengetahuan dan teori yang mendasari kavitasi, yaitu konsep tentang kavitasi, parameter kavitasi, formasi kavitasi, teori pecahnya gelembung uap air, tekanan di dasar saluran curam, karakteristik kavitasi di permukaan saluran, serta mekanika fluida dan hidraulika. Masing-masing sub bab dilengkapi dengan contoh yang relevan guna membantu pemahaman pembaca. Contoh-contoh banyak dirujuk dari buku "*Cavitation in Chute and Spillways*" yang ditulis oleh Henry T. Falvey.

Kavitasi dapat juga dijelaskan oleh kejadian-kejadian sebagai berikut. Pada saat aliran meluncur di saluran luncur pelimpah bendungan, pada jarak tertentu dari mercu pelimpah maka kecepatan aliran menjadi sangat tinggi, misalnya menjadi 30 m/s, sehingga tekanan menjadi sangat rendah bahkan mencapai sama dengan tekanan uap, maka terjadilah kavitasi. Pada saat tekanan sangat rendah terbentuklah gelembung mikroskopis, makin ke hilir saluran luncur gelembung makin besar ukurannya, di samping itu isi gelembung itu adalah uap air maka makin ke hilir gelembung akan menuju ke tekanan aliran yang lebih tinggi, sehingga gelembung uap air itu akan pecah dan memancarkan energi yang sangat tinggi yang merambat dan membentur ke arah dasar atau dinding samping saluran luncur yang selanjutnya akan merusaknya. Kerusakan dasar saluran luncur dimulai dari erosi atau lubang kecil dan menjadi lubang besar akhirnya akan menggerus dasar saluran luncur yang akhirnya meruntuhkan saluran luncur tersebut. Runtuhnya saluran luncur bangunan pelimpah akan menyebabkan bendungan sangat terancam keruntuhan pula, yang mana akan membahayakan kehidupan masyarakat yang ada di hilir bendungan.

Saluran curam di bangunan hidraulik banyak wujudnya, misalnya bendung, saluran luncur pelimpah bendungan, serta saluran buatan yang meluncur sangat curam dan panjang. Di saluran curam lazimnya aliran berkecepatan sangat tinggi, di samping itu mempunyai tekanan yang sangat rendah yang mana hal ini merupakan salah satu indikator bakal terjadinya kavitasi. Di paragraf di atas telah dijelaskan bahwa kavitasi merupakan fenomena perusak struktur hidraulika yang sangat berbahaya, oleh karena itu harus dicegah bahkan jika dapat dihilangkan sama sekali.

Berdasarkan pengalaman penulis, penyajian di dalam buku ini dibagi menjadi 6 (enam) bab. Bab I berisi mengenai konsep dasar kavitasi, terutama berkaitan dengan teori kavitasi serta dinamika proses pecahnya gelembung udara. Bab II menjelaskan mengenai karakteristik kavitasi pada aliran permukaan. Bab III

menguraikan dan membahas tentang kerusakan karena kavitasi. Bab IV dijelaskan tentang perancangan aerator untuk mencegah terjadinya kavitasi; pada bab ini diberikan juga persamaan-persamaan yang dapat digunakan untuk mendesain aerator. Bab V berisi tentang rekomendasi-rekomendasi yang dapat digunakan dalam merancang aerator di saluran curam. Bab VI menguraikan tentang hasil penelitian penulis berkaitan dengan efektifitas aerator dalam mengurangi atau mencegah terjadinya kavitasi. Bab VI ini merupakan wujud integritas penulis terhadap pengembangan ilmu hidraulika maupun hidrodinamika yaitu melalui sumbangan hasil penelitian penulis untuk memberikan dukungan kepada konsep dasar ataupun teori yang telah disusun oleh peneliti di bidang kavitasi sebelumnya. Beberapa bab terdapat contoh-contoh perhitungan, bahkan di dalam Bab IV dan Bab VI tentang rancangan aerator disertakan konsep dan langkah-langkah merancang aerator di saluran luncur pelimpah bendungan (*chute spillway*), serta diberikan contoh penggunaan persamaan-persamaan itu ke dalam praktik desain aerator pada skala laboratorium. Dengan demikian mahasiswa S1, S2 dan S3 Jurusan Teknik Sipil serta praktisi bendungan dapat merujuk persamaan ataupun contoh perancangan untuk mendesain aerator di lakosi saluran curam lain.

Pada kesempatan ini saya mengucapkan terima kasih kepada semua pihak, baik instansi terutama adalah DP2M Dirjen Dikti Depdikbud maupun perorangan, pakar, teman sejawat atas data, masukan, informasi, dorongan dan bantuannya dalam menyelesaikan buku ini. Terima kasih secara khusus saya sampaikan kepada Tim Penelitian yang berjudul “Kinerja Aerator dalam Mengurangi Gejala Kavitasi pada Aliran Superkritik Di Dasar Saluran Curam” yaitu berkat kerjasamanya dapat memberikan sumbangan bagi tersusunya buku ini. Secara sangat khusus ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada istri saya Dra. Ely Rudyatmi, M.Si. atas kesabaran dan masukan yang diberikan demi perbaikan isi buku ini, serta anak-anak saya, Rifki Ruriardi, S.T.; Shani Ruri Efendi; dan Cindy Syaharani Ruriasri yang menjadi penghibur dalam proses penulisan dan penyelesaian buku ini.

Saya menyadari bahwa buku ini masih jauh dari sempurna, khususnya dalam hal memenuhi harapan dan keinginan pembaca. Oleh karena itu segala kritik, saran, dan masukan dari pakar, rekan sejawat, pemerhati serta masyarakat sangat diharapkan guna kesempurnaan buku ini.

Semarang, September 2014
Penyusun,
Dr. Eng. Yeri Sutopo, M.T.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR		ii
DAFTAR ISI		iv
DAFTAR GAMBAR DAN FOTO		viii
DAFTAR TABEL		xiii
DAFTAR SIMBOL		xvi
BAB I	KONSEP DASAR	
	1.1 Deskripsi tentang Kavitasi	1
	1.2 Parameter Kavitasi	4
	1.3 Formasi Kavitasi	12
	1.3 1 Teori	12
	1.3 2 Verifikasi empirik	17
	1.3 3 Dinamika pecahnya gelembung udara	21
	1.3 4 Teori	12
BAB II	KARAKTERISTIK KAVITASI PADA ALIRAN PERMUKAAN	
	2.1 Kategori Kekasaran permukaan	28
	2.2 Kekasaran Bentuk Tunggal	30
	2.2.1 Aliran melalui undakan (<i>offset</i>)	30
	2.2.2 Lubang di lapisan batas	40
	2.2.3 Alur yang melintang di saluran curam	41
	2.2.4 Alur sejajar dengan arah aliran	44
	2.2.5 Kekasaran yang seragam	45
	2.2.6 Kombinasi antara kekasaran seragam dengan kekasaran tunggal	46
BAB III	KERUSAKAN KARENA KAVITASI	
	3.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kerusakan karena Kavitasi pada Permukaan Saluran	48

	Curam	
	3.2 Penyebab Kavitasi	49
	3.3 Lokasi Kerusakan	49
	3.4 Intensitas Kavitasi	54
	3.5 Pengaruh Kecepatan	57
	3.6 Pengaruh Konsentrasi Udara	58
	3.7 Resistensi Permukaan Saluran terhadap Kerusakan Kavitasi	59
	3.8 Pengaruh Lama Paparan Kavitasi terhadap Kerusakan	60
	3.9 Parameter yang Digunakan untuk Memprakirakan Kerusakan	62
	3.10 Potensi Kerusakan	65
	3.11 Indeks Kerusakan	66
	3.12 Nilai Rancangan	68
	3.13 Pengenalan Kerusakan karena Kavitasi	74
BAB IV	RANCANGAN AERATOR	
	4.1 Pertimbangan Memasang Aerator	80
	4.2 Tipe Aerator	83
	4.3 Lokasi Aerator	84
	4.4 Rancangan Deflektor	86
	4.5 Rancangan Ventilasi Udara	90
	4.6 Rancangan Undakan (<i>offset</i>)	93
	4.7 Jarak antar Aerator	95
	4.7.1 Lokasi aerator yang pertama	97
	4.7.2 Jarak antar aerator	98
	4.8 Prosedur Rancangan Aerator	99
BAB V	REKOMENDASI RANCANGAN AERATOR	
	5.1 Latar Belakang Rekomendasi	101
	5.2 Spesifikasi Permukaan Saluran Luncur	104

5.1.1 Undakan (<i>offset</i>)	104
5.1.2 Kemiringan dasar saluran lancar	104
5.1.3 Distribusi kekasaran dasar saluran lancar	105
5.1.4 Toleransi terhadap permukaan aliran	105
5.1.5 Pertimbangan geometri	106
5.3 Prosedur Rancangan Pelimpah	110

BAB VI

DISTRIBUSI GELEMBUNG UDARA SETELAH DIPASANG AERATOR PADA SALURAN CURAM SERTA KAITANNYA DENGAN PELUANG TERJADINYA KAVITASI (PENELITIAN EKSPERIMEN LABORATORIUM)

6.1 Metode penelitian	111
6.2 Instrumen pengukur tekanan	113
6.3 Instrumen pengukur luas gelembung udara	114
6.4 Langkah-langkah Menentukan Tinggi Tekanan di Dasar Saluran	116
6.5 Langkah-langkah menentukan distribusi gelembung udara	118
6.6 Profil distribusi konsentrasi gelembung udara pada kondisi pemasukan udara alamiah (<i>self air entrainment</i>) di saluran curam	119
6.7 Profil distribusi konsentrasi gelembung udara di titik 6,2 m dari <i>inlet flume</i>	122
6.8 Profil distribusi konsentrasi gelembung udara di titik 7,2 m dari <i>nlet flume</i>	122
6.9 Perbandingan kedekatan bentuk distribusi konsentrasi gelembung udara antara C Chanson (1995), C Straub dan Anderson (1958) terhadap C (%) eksperimen	123
6.10 Lokasi <i>Point of Inception</i> Diukur dari <i>Inlet Flume</i> pada Kondisi Pemasukan Udara Alamiah (<i>Self Air Entrainment</i>) Di Saluran Curam	130
6.11 Tekanan pada Kondisi Pemasukan Udara Alamiah (<i>Self Air Entrainment</i>) Di Titik 3,5 m, 4,5 m, 6,2 m dan 7,2 m hilir <i>Inlet Flume</i>	132
6.12 Rancangan Aerator (kombinasi antara <i>deflector</i> , <i>duct</i> , dan <i>air duct</i>) untuk Mengurangi Gejala Kavitas	135
6.13 Profil Distribusi Konsentrasi Gelembung Udara pada Kondisi Pemasukan Udara Buatan (<i>Artificial</i>)	141

<i>Air Entrainment</i>) Di Saluran Curam	
6.14 Simpulan dan Saran penelitian	152
DAFTAR PUSTAKA	158
LAMPIRAN-LAMPIRAN	163

DAFTAR GAMBAR DAN FOTO

No. Gambar	Deskripsi	Halaman
Gambar 1.1	Hubungan antara suhu dan tekanan yang menyebabkan kavitasi	2
Gambar 1.2	Distribusi tekanan pada tiang <u>hemispherical</u>	5
Gambar 1.3	Definisi skala tekanan	7
Gambar 1.4	Rujukan mengenai definisi kecepatan aliran	9
Gambar 1.5	Kondisi-kondisi rujukan untuk aliran geser	10
Gambar 1.6	Perkembangan kavitasi	13
Gambar 1.7	Kondisi kesetimbangan untuk gelembung uap air yang berisi air	14
Gambar 1.8	Koefisien hukum Henry's	18
Gambar 1.9	Pengaruh kecepatan aliran terhadap kavitasi gas yang porous	19
Gambar 1.10	Sejarah gelembung pada aliran disekeliling ogive yang memiliki ukuran 1,5 diameter	22
Gambar 1.11	Mekanisme proses pecahnya gelembung	23
Gambar 2.1	Elemen kekasaran tipikal yang terisolasi yang ditemukan di struktur hidraulik	29
Gambar 2.2	Karakteristik kavitasi permulaan yang disebabkan oleh undakan (<i>offsets</i>) menurut Colgate dan Elder	31
Gambar 2.3	Karakteristik kavitasi permulaan di tepi miring dari undakan miring dan lonjong bundar	32
Gambar 2.4	Karakteristik kavitasi undakan tipe miring	36
Gambar 2.5	Karakteristik kavitasi beberapa tipe undakan	39

No. Gambar	Deskripsi	Halaman
Gambar 2.6	Kerusakan karena kavitasi berupa lubang berukuran kecil	41
Gambar 2.7	Kerusakan karena kavitasi yang berupa lubang	42
Gambar 2.8	Karakteristik kavitasi pada slot pintu	43
Gambar 2.9	Kerusakan kavitasi pada groove arah aliran	45
Gambar 3.1	Kerusakan bendungan Glen Canyon, pelimpah Tunnel sebelah kiri di stasiun 760,7 m	51
Gambar 3.2	Kerusakan bendungan Glen Canyon, pelimpah Tunnel sebelah kiri di stasiun 739,38 m	54
Gambar 3.3	Laju kerusakan karena kavitasi menurut Stinebring	55
Gambar 3.4	Hubungan antara kerusakan karena kavitasi dengan indeks kavitasi	56
Gambar 3.5	Perbandingan resistansi kavitasi pada berbagai material (Colgate, 3)	60
Gambar 3.6	Laju kerusakan karena kavitasi Heyman [7]	61
Gambar 3.7	Pengalaman kerusakan karena kavitasi	63
Gambar 3.8	Variasi indeks kerusakan dengan debit dan waktu	68
Gambar 3.9	Bendungan Glen Canyon, terowongan pelimpah sebelah kiri. Kerusakan di stasiun 760,20 m, 6 Juni 1980	71
Gambar 3.10	Bendungan Glen Canyon, terowongan sebelah kiri	72
Gambar 3.11	Tekstur kerusakan karena kavitasi di saluran yang terbuat dari baja	75
Gambar 3.12	Kerusakan karena kavitasi di saluran curam yang konstruksinya berupa beton	76

No. Gambar	Deskripsi	Halaman
Gambar 3.13	Kerusakan karena kavitasi di saluran curam pada katup kupu-kupu	77
Gambar 3.14	Kerusakan kavitasi di zona pembekuan	78
Gambar 3.15	Kerusakan kavitasi di hilir pintu pada pelimpah menggunakan pintu bukan pelimpah bebas	79
Gambar 3.16	Kerusakan karena kavitasi disebabkan oleh pusaran aliran arah membujur di dalam aliran melalui pintu air	79
Gambar 4.1	Tipe aerator yang dipasang di saluran luncurpelimpah	83
Gambar 4.2	Panjang lompatan aliran	88
Gambar 4.3	Sudut lintasan air di atas aerator (deflektor)	89
Gambar 4.4	Kombinasi antara ventilasi, lerengan, dan groove atau alur	92
Gambar 4.5	Pemasangan aerator berupa offset yang dikombinasikan dengan alur atau groove atau slot	95
Gambar 4.6	Rujukan argumentasi memasang aerator kedua di saluran luncur	97
Gambar 5.1	Ambang pelimpah bendungan Lombardi	109
Gambar 6.1	Tata letak alat dan instrumen penelitian	112
Gambar 6.2	Sistem instrumen pengukur tekanan	114
Gambar 6.3	Sistem akuisisi data luas gelembung udara	115
Gambar 6.4	Langkah-langkah menentukan tinggi tekanan di dasar saluran	117
Gambar 6.5	Bagan alir menentukan konsentrasi gelembung udara	119

Gambar 6.6	Profil distribusi konsentrasi gelembung udara di titik 6,2 m dari <i>inlet flume</i>	125
Gambar 6.7	Profil distribusi konsentrasi gelembung udara di titik 6,2 m dari <i>inlet flume</i> pada $Q= 20,9$ l/s, serta $\alpha = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$	126
Gambar 6.8	Profil distribusi konsentrasi gelembung udara di titik 7,2 m dari <i>inlet flume</i>	127
Gambar 6.9	Profil distribusi konsentrasi gelembung udara di titik 7,2 m dari <i>inlet flume</i> pada $Q = 20,9$ l/s serta $\alpha = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$	128
Gambar 6.10	Sudut lintasan air di atas aerator (deflektor) rancangan	136
Gambar 6.11	Kedalaman kolam air h_p di sisi hilir aerator rancangan	139
Gambar 6.12	Dimensi aerator (kombinasi antara <i>deflector</i> dan <i>duct</i>) hasil rancangan penelitian	140
Gambar 6.13	Konsentrasi gelembung udara pada $\alpha=25^\circ$, $Q=20,9$ l/s, di titik 7,2 m dari <i>inlet flume</i> di <i>aeration zone</i> tepat di atas deflektor, bilangan Froude=6,7	142
Gambar 6.14	Distribusi konsentrasi gelembung udara pada $\alpha=25^\circ$, $Q=20,9$ l/s di titik 7,2 m dari <i>inlet flume</i> di <i>free surface aeration</i> tepat di $x/l=0,50$	145
Gambar 6.15	Profil distribusi konsentrasi gelembung udara sebelum dipasang aerator	147
Gambar 6.16	Profil distribusi konsentrasi gelembung udara setelah dipasang aerator	147
Gambar 6.17	Distribusi konsentrasi gelembung udara C (%) eksperimen di <i>fully aerated jet</i> pada $\alpha=25^\circ$, $Q=20,9$ l/s	148

Gambar 6.18	Profil distribusi konsentrasi gelembung udara setelah dipasang aerator di <i>fully aerated jet</i> pada $\alpha=25^\circ$, $Q=20,9$ l/s	149
Gambar 6.19	Distribusi konsentrasi gelembung udara C (%) eksperimen di <i>down stream flow region</i> pada $\alpha=25^\circ$, $Q=20,9$ l/s	150
Gambar 6.20	Profil distribusi konsentrasi gelembung udara setelah dipasang aerator di <i>down stream flow region</i> pada $\alpha=25^\circ$, $Q=20,9$ l/s	151

DAFTAR TABEL

No. Tabel	Deskripsi	Halaman
Tabel 1.1	Nilai masa jenis air, tekanan uap, dan viskositas air sebagai fungsi temperatur	8
Tabel 1.2	Pengaruh tegangan permukaan dan udara terhadap indeks kavitasi permulaan	20
Tabel 2.1	Koefisien ketidakraturan pada segitiga dan busur lingkaran	38
Tabel 2.2	Karakteristik kavitasi pada lubang di lapis batas	40
Tabel 3.1	Panjang lubang karena kavitasi di bendungan Glen Canyon, pelimpah Tunnel sebelah kiri di stasiun 760,7 m	51
Tabel 3.2	Panjang lubang karena kavitasi di bendungan Glen Canyon, pelimpah Tunnel sebelah kiri di stasiun 739,38 m	52
Tabel 3.3	Indeks kerusakan pada Bendungan Glen Canyon, terowongan sebelah kiri	69
Tabel 3.4	Nilai rancangan dari potensial kerusakan dan indeks kerusakan	73
Tabel 4.1	Hubungan antara lokasi aerator dan debit kritis	85
Tabel 4.2	Penurunan konsentrasi udara ke arah hilir	96
Tabel 5.1	Toleransi penggerindaan atau penghalusan pada aliran berkecepatan sangat tinggi	102
Tabel 5.2	Toleransi aliran permukaan	105
Tabel 5.3	Spesifikasi toleransi aliran permukaan	106
Tabel 6.1	Rekapitulasi perbandingan kedekatan antara	124

	teori Chanson (1995) dengan teori Straub dan Anderson (1958) terhadap distribusi konsentrasi gelembung udara C eksperimen	
Tabel 6.2	Persamaan empirik distribusi konsentrasi gelembung udara di zona <i>underlying</i> dan <i>mixing</i>	129
Tabel 6.3	Perbandingan empat metode dalam menghitung lokasi <i>point of inception</i> (X_c) terhadap lokasi <i>point of inception</i> eksperimen pada $\alpha=15^\circ$, 20° , 25° dan $Q=9,4$ l/s, $11,5$ l/s dan $20,9$ l/s	131
Tabel 6.4	Tekanan di empat titik hilir <i>inlet flume</i> $Q=20,9$ l/s dan $\alpha=25^\circ$	132
Tabel 6.5	Tekanan di empat titik hilir <i>inlet flume</i> $Q=20,9$ l/s dan $\alpha=20^\circ$	134
Tabel 6.6	Tekanan di empat titik hilir <i>inlet flume</i> $Q=20,9$ l/s dan $\alpha=15^\circ$	134
Tabel 6.7	Penurunan tekanan maksimal dan kecepatan udara di alur	138
Tabel 6.8	<i>Error absolut</i> rerata (E_{abs}^-), Simpangan baku E_{abs} konsentrasi gelembung udara C (%) antara eksperimen dan teori (Chanson, 1995) pada $\alpha=25^\circ$, $Q=20,9$ l/s, di titik $7,2$ m dari <i>inlet flume</i> di <i>aeration zone</i> tepat di atas deflektor, bilangan Froude= $6,7$	143
Tabel 6.9	<i>Error absolut</i> rerata (E_{abs}^-), Simpangan baku E_{abs} konsentrasi gelembung udara C (%) antara eksperimen dan teori (Straub dan Anderson, 1958) pada $\alpha=25^\circ$, $Q=20,9$ l/s, di titik $7,2$ m dari <i>inlet flume</i> di <i>aeration zone</i> tepat di atas	144

Tabel 6.10	deflektor, bilangan Froude=6,7 <i>Error absolut</i> rerata (E_{abs}^-), Simpangan baku E_{abs}) konsentrasi gelembung udara C (%) antara eksperimen dan teori (Chanson, 1995) pada $\alpha=25^\circ$, $Q=20,9$ l/s, di titik 7,2 m dari <i>inlet</i> <i>flume</i> di <i>free surface aeration</i> tepat di $x/l=0,50$	146
------------	--	-----

DAFTAR SIMBOL

A_0	:	Luas di hulu pipa secara <i>cross sectional</i>
a	:	$7,7I_c^{0,44}$
A_r	:	Koefisien lintasan air
C_n	:	Faktor tekanan= $(P_a - P_j)/\rho q$
C_b	:	Koefisien kehilangan oleh Borda $(H_u - H_d)/(V_e^2/2g)$
C_f	:	Koefisien resisten merata
C_x	:	Konsentrasi udara merata yang berjarak X
C_0	:	Konsentrasi udara merata yang diawal proses aerasi
D_i	:	Indeks kerusakan di akhir debit sebelumnya
D_p	:	Kerusakan potensial, untuk debit selanjutnya
d_0	:	Ketinggian offset
E_f	:	Energi potensial aliran
E_0	:	Energi potensial di titik rujukan
E_d	:	Kedalaman pada saat kerusakan karena kavitasi
F_0	:	Bilangan Froude aliran di atas lerengan
F_0	:	$v_0 / \{g(h_0 \cos \theta_i)\}^{1/2}$
f	:	Faktor gesekan Darcy-Weisbach
g	:	Kecepatan gravitasi (m/s ²)
h_p	:	Kedalaman kolam air
h_i	:	Kedalaman aliran sisi hilir tubrukan aliran dengan lantai pelimpah
H_d	:	Tinggi tekanan di hilir katup
H_t	:	Tinggi tekanan total di hulu katup
H_v	:	Tekanan uap yang relatif terhadap tekanan atmosfer

H_u	:	Sama dengan tinggi tekanan total di hulu katup
H	:	Tinggi undakan
h_0	:	Kedalaman aliran ujung akhir lerengan
I_c	:	Intensitas kerusakan karena kavitasi $(\sigma_r - \sigma_{fh}) / \sigma_r$
L_x	:	Jarak miring saluran luncur dihilir aerator
L_0	:	Jarak miring saluran luncur di ukur dari aerator sampai dengan dimulainya proses aerasi
L_c	:	Panjang kemiringan undakan (undakan miring)
L_k	:	Panjang awan kavitasi
m	:	Masa gas
M	:	Masa 1 mole dari gas
n_m	:	Angka mole= m/M
P	:	Intensitas tekanan (m)
P_0	:	Tinggi tekanan rujukan(m)
P_v	:	Tekanan uap air
P_a	:	Tekanan atmosfer
P_g	:	Tekanan <i>gauge</i>
P_r	:	Tekanan vakum
P_h	:	Tekanan dalam aliran di lokasi yang datar di luar <i>offset</i>
P_u	:	Tekanan dalam aliran di hulu awal terjadinya lapis batas
P_v	:	Tekanan uap air
P_p	:	Tekanan parsial gas
P_d	:	Perbedaan antara tekanan aliran minimal dan tekanan uap air
P_b	:	Tekanan di wilayah datar yang tidak teratur
P_j	:	Tekanan di bawah lompatan aliran
P_e	:	Tekanan aliran di pusat <i>jet</i>

q	:	Debit per satuan lebar aliran
R _g	:	Konstanta gas <i>engineering</i> untuk udara
R ₀	:	Diameter awal gelembung
R _u	:	Konstanta gas universal
r	:	Jari-jari gelembung udara
R _h	:	Bilangan Reynolds didasarkan atas ketinggian undakan pada kecepatan aliran bebas
r _c	:	Radius kritik= $\frac{3}{2} \left(\frac{mR_g T_k}{\pi \varepsilon} \right)$
S	:	Parameter bentuk lapis batas
t	:	Waktu
t ₀	:	Konstanta integrasi
t _c	:	Total waktu operasi
T _k	:	Temperatur mutlak (Kelvin)
x _i	:	Jarak horizontal dari ujung lerengan sampai dengan efek dari lintasan jet
y ₀	:	Elevasi di mulut lerengan
y _n	:	Elevasi di garis pusat titik tubrukan antara air dengan lantai pelimpah
y _i	:	Elevasi di titik tubrukan antara air dengan lantai pelimpah
y	:	Garis vertikal koordinat (diukur dari lapis batas)
v	:	Kecepatan aliran (m/s)
v _a	:	Kecepatan aliran karakteristik
v _b	:	Kecepatan aliran di atas undakan (offset)
v ₀	:	Kecepatan aliran rujukan (m/s)
v _u	:	Kecepatan aliran rujukan
v _h	:	Kecepatan aliran di puncak <i>offset</i>

v_u	:	Kecepatan aliran di hulu dimulainya lapis batas
v_b	:	Kecepatan aliran di lokasi datar di luar <i>offset</i>
v_e	:	Kecepatan aliran di pusat <i>jet</i>
v_g	:	Volume gas
v_h	:	Kecepatan aliran di atas undakan
v_y	:	Kecepatan aliran pada saat y
v_r	:	Kecepatan aliran rujukan
v_i	:	Kecepatan rerata pancaran aliran di titik tubrukan antara air dengan lantai pelimpah
z	:	Kedalaman normal (m)
Z_0	:	Tinggi elevasi rujukan (m)
α	:	Sudut saluran curam
β	:	Konsentrasi gas
δ	:	Ketebalan lapis batas
ρ	:	Masa jenis air
π	:	3,14159
σ_i	:	Indeks kavitasi permulaan
σ_k	:	Indeks kavitasi yang didasarkan pada kecepatan aliran di atas undakan
σ_u	:	Indeks kavitasi tanpa lapis batas
σ	:	Indeks kavitasi aliran
σ_s	:	Indeks kavitasi pada saat kerusakan dimulai, parameter ini berkaitan dengan indeks kavitasi ketika $L_k/H=1$
σ_{fh}	:	Indeks kavitasi aliran berdasarkan pada kondisi di atas undakan lihat Persamaan 1.9
σ_S	:	Indeks kavitasi pada saat awal kerusakan
σ_f	:	Indeks kavitasi aliran
θ_e	:	Sudut deflektor atau lerengan

θ_0 : Sudut antara lerengan dan horisontal

ϕ : Sudut kemiringan lerengan terhadap dasar pelimpah

0,017 : Konstanta per meter adalah $0,0017 \text{ m}^{-1}$

BAB I

KONSEP DASAR

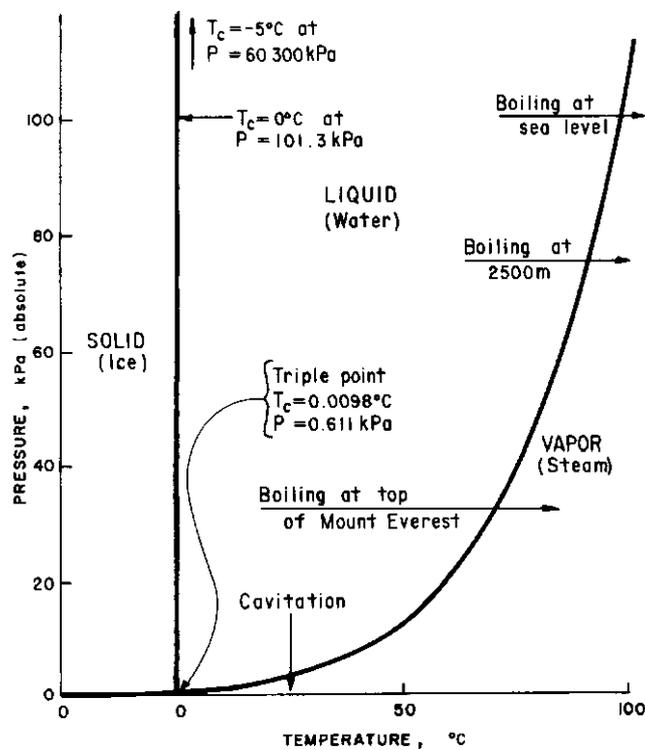
1.1 Deskripsi tentang Kavitasi

Kavitasi adalah proses yang biasanya berhubungan dengan kerusakan permukaan dinding saluran, pipa, atau kipas pompa yang ditandai oleh suara bising dalam suatu sistem aliran. Kedua gejala itu mungkin terjadi selama proses kavitasi, namun sebenarnya kavitasi bukanlah kerusakan permukaan dinding saluran, pipa, atau kipas pompa yang ditandai suara bising saja. Di samping itu, kavitasi didefinisikan juga sebagai pembentukan gelembung udara di dalam aliran. Jika ruang di dalam gelembung udara diisi oleh uap air, maka proses tersebut dapat diklasifikasikan sebagai kavitasi uap. Jika ruang gelembung udara di dalam aliran diisi oleh gas selain uap air, proses ini disebut kavitasi gas. Di dalam buku ini kavitasi difokuskan pada kavitasi uap.

Proses kavitasi dapat dipahami melalui proses memasak air menggunakan ketel. Pada saat air dipanaskan, suhu di dalam ketel meningkat yang mengakibatkan peningkatan tekanan uap di dalamnya. Ketika tekanan uap sama dengan tekanan lokal atau tekanan atmosfer, maka proses “pendidihan” akan terjadi. Pada saat di dalam ketel mencapai titik didih, maka air berubah menjadi uap air. Perubahan air menjadi uap air ditandai oleh gelembung-gelembung kecil yang muncul dari dasar ketel menuju ke atas dan tumbuh menjadi gelembung uap dengan ukuran yang lebih besar untuk selanjutnya pecah.

Suhu pada saat air mendidih merupakan fungsi dari tekanan. Pada kondisi tekanan yang rendah, pendidihan akan terjadi pada suhu rendah juga. Tekanan adalah fungsi dari ketinggian tempat, maka pendidihan terjadi pada suhu rendah serta pada ketinggian tempat yang besar seperti yang tersaji dalam Gambar 1. Pada saat elevasi ketinggian sama dengan 2500 m di atas permukaan air laut, maka titik didih air akan lebih rendah dari 100°C, berdasarkan Gambar 1 adalah sebesar 80°C.

Kavitasi terbentuk dalam air pada saat titik didih telah tercapai, yang mana hal ini terjadi ketika tekanan dalam ketel sama dengan tekanan uap air, namun secara teknis terdapat perbedaan antara mendidih dan kavitasi. Mendidih adalah suatu proses dari bentuk cair ke bentuk uap dengan memvariasikan suhu sambil mengendalikan tekanan dalam ketel konstan. Kavitasi adalah suatu proses dari bentuk cair ke bentuk uap dengan memvariasikan tekanan dalam ketel sambil mengendalikan suhu dalam ketel konstan. Pengurangan tekanan yang terkait dengan kavitasi dapat disebabkan oleh turbulensi serta pusaran di dalam aliran.



Gambar 1.1 Hubungan antara suhu dan tekanan yang menyebabkan kavitasi

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Salah satu contoh dari pembentukan gelembung udara di dalam aliran, yaitu yang terjadi karena penurunan tekanan, nampak ketika botol berisi cairan berkarbonasi dibuka. Setelah botol dibuka, gelembung udara yang terbentuk dalam cairan akan naik menuju ke permukaan. Sementara itu, dalam botol yang tertutup, cairan

diberikan tekanan yang cukup untuk menjaga karbon dioksida tetap berada dalam larutan. Namun, pada saat botol dibuka, tekanan berkurang dan cairan di dalam botol menjadi relatif jenuh terhadap karbon dioksida. Oleh karena itu, karbon dioksida mulai menyebar keluar dan terpisah dari cairan. Contoh ini adalah salah satu yang disebut sebagai "kavitasi gas", yang mana tekanan uap di dalam cairan tidak pernah tercapai.

Dalam struktur hidraulik, air mengandung gelembung mikroskopis dalam berbagai ukuran. Gelembung mikroskopis dalam air merupakan awal dimulainya kavitasi. Penguapan adalah faktor yang paling penting dalam pertumbuhan gelembung yang menjadi penyebab timbulnya kavitasi. Kehadiran gelembung mikroskopis dalam aliran memiliki pengaruh pada kerusakan dan suara bising yang disebabkan oleh kavitasi.

Kavitasi dapat juga dijelaskan oleh kejadian-kejadian sebagai berikut. Pada saat aliran meluncur di saluran luncur pelimpah bendungan, pada jarak tertentu dari mercu pelimpah maka kecepatan aliran menjadi sangat tinggi, misalnya menjadi 30 m/s, sehingga tekanan menjadi sangat rendah bahkan mencapai sama dengan tekanan uap P_v , maka terjadilah kavitasi. Pada saat tekanan sangat rendah terbentuklah gelembung mikroskopis, makin ke hilir saluran luncur gelembung makin besar ukurannya, di samping itu isi gelembung itu adalah uap air maka makin ke hilir gelembung akan menuju ke tekanan aliran yang lebih tinggi, sehingga gelembung uap air itu akan pecah dan memancarkan energi yang sangat tinggi yang merambat dan membentur ke arah dasar atau dinding samping saluran luncur yang selanjutnya akan merusaknya. Kerusakan dasar saluran luncur dimulai dari erosi atau lubang kecil dan menjadi lubang besar akhirnya akan menggerus dasar saluran luncur yang akhirnya meruntuhkan saluran luncur tersebut. Runtuhnya saluran luncur bangunan pelimpah akan menyebabkan bendungan sangat terancam keruntuhan pula, yang mana akan membahayakan kehidupan masyarakat yang ada di hilir bendungan.

1.2 Parameter Kavitas

Pada bagian deskripsitentang kavitas menguraikan adanya kombinasi kondisi kritis karena kecepatan aliran, tekanan aliran, dan tekanan uap air yang mana kavitas akan muncul, menghilang, atau spontan menjadi transisi ke superkavitas. Parameter yang dapat digunakan untuk mendefinisikan berbagai ragam kavitas di atas, dikenal sebagai indeks kavitas seperti diturunkan di bawah ini.

Persamaan untuk aliran tetap diantara dua titik dalam aliran dikenal sebagai persamaan Bernoulli. Persamaan ini dapat ditulis:

$$\frac{\rho v_0^2}{2} + P_0 + Z_0 \rho g - \frac{\rho v^2}{2} + P + z \rho g \quad (1.1)$$

Keterangan:

- P : Intensitas tekanan (m)
- P₀ : Tinggi tekanan rujukan(m)
- v : Kecepatan aliran (m/s)
- v₀ : Kecepatan aliran rujukan (m/s)
- z : Kedalaman normal (m)
- Z₀ : Tinggi titik rujukan (m)
- ρ : Masa jenis air
- g : Kecepatan gravitasi (m/s²)

Pada satuan yang berdimensi persamaan (1.1) di atas setara dengan koefisien tekanan (C_p)

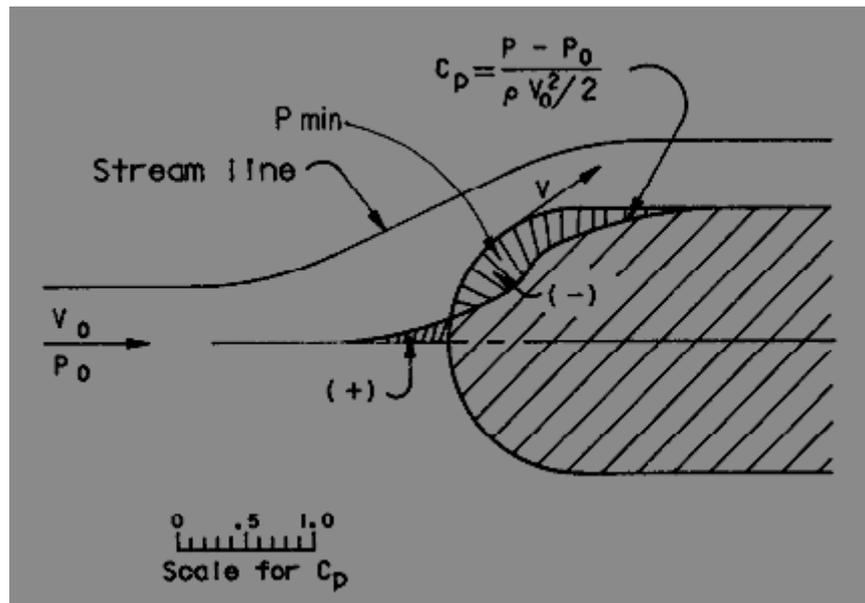
$$C_p = \frac{(P + z \rho g) - (P_0 + Z_0 \rho g)}{\rho v_0^2 / 2} = \frac{E_f - E_0}{\rho v_0^2 / 2} = 1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \quad (1.2)$$

Keterangan:

- E_f : Energi potensial aliran

E_0 : Energi potensial di titik rujukan

Subskrip o merujuk pada aliran hulu seperti yang tertulis dalam Gambar 1.2 di bawah ini.



Gambar 1.2 *Distribusi tekanan pada tiang hemispherical*

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Pada banyak kasus, variabel gravitasi relatif kecil terhadap variabel tekanan, dapat dikatakan kedua variabel memiliki nilai yang sama, dengan demikian, koefisien tekanan dapat ditulis sebagai berikut:

$$C_p = \frac{P - P_0}{\rho v_0^2 / 2} \quad (1.3)$$

Koefisien tekanan juga dikenal sebagai parameter tekanan atau bilangan Euler. Nilai dari bilangan Euler, di setiap titik di tubuh tiang *hemispherical* adalah konstan selama tekanan minimum pada tubuh tiang *hemispherical* lebih besar daripada tekanan uap air. Sebagai contoh, pada Gambar 1.2, tekanan di setiap titik di

batang tiang *hemispherical* dapat diprediksi berdasarkan nilai variabel yang terdapat di hulu tiang *hemispherical*. Namun, jika tekanan di lokasi yang berhubungan dengan nilai bilangan Euler minimum turun sampai dengan di bawah nilai tekanan uap, maka tekanan pada titik tersebut tidak akan turun lebih tajam. Kondisi hulu yang berhubungan dengan timbulnya kavitasasi dapat dihitung dengan mengganti variabel tekanan dalam Persamaan 1.2 dengan tekanan uap dan menetapkan nilai rasio sama dengan bilangan Euler minimum. Parameter yang dihasilkan dikenal sebagai indeks kavitasasi, σ (bilangan Thoma).

$$\sigma = \frac{E_0 - Z_{pg} - P_v}{\rho v_0^2 / 2} = -(-C_p)_{\min} \quad (1.4)$$

Jika ketinggian Z dan Z_0 adalah sama, indeks kavitasasi dinyatakan sebagai:

$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{\rho v_0^2 / 2} = -(-C_p)_{\min} \quad (1.5)$$

Keterangan:

P_v : Tekanan uap air

Pada tubuh bidang yang ramping dan halus (sayap pesawat terbang), tekanan yang paling negatif terjadi di bidang perbatasan (*boundary*). Pada kasus ini, besaran indeks kavitasasi dapat diperkirakan dari hasil pengukuran tekanan di permukaan. Namun, jika tubuh tidak ramping dan halus, aliran akan terpisah dari tubuh tiang *hemispherical* dan tekanan yang paling negatif akan terjadi dalam aliran. Pada kasus ini, indeks kavitasasi akan lebih kecil dari nilai absolut minimum bilangan Euler yang terjadi pada tubuh tiang *hemispherical*.

Kebingungan dapat dihindari, jika tekanan uap dan tekanan rujukan didasarkan pada tekanan nol mutlak seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.3 di bawah ini.

Misalnya, dalam unit satuan mutlak, tekanan rujukan dirumuskan seperti tersaji di bawah ini.

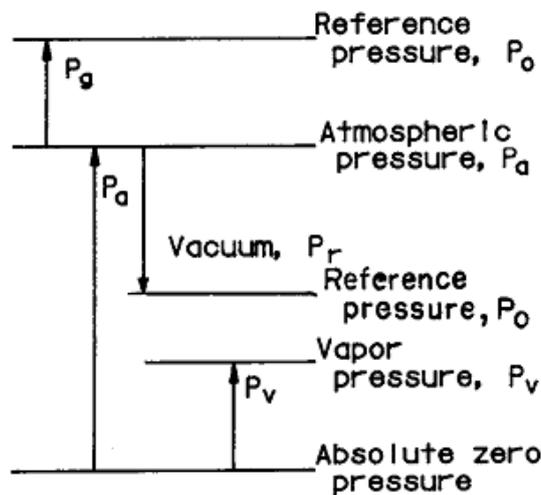
$$P_0 = P_a + P_g \quad (1.6)$$

Pada sumber literatur, kadang-kadang tekanan rujukan diturunkan nilai tekanannya menjadi tekanan vakum. Hal ini dilakukan untuk menghindari agar tekanan p_g tidak negatif bila tekanan rujukan nilainya kurang dari tekanan atmosfer p_a . Bila menggunakan nilai tekanan vakum, hubungan yang sesuai dengan tekanan rujukan, p_0 , dirumuskan sebagai berikut:

$$P_0 = P_a - P_r \quad (1.7)$$

Keterangan:

- P_a : Tekanan atmosfer
- P_g : Tekanan *gauge*
- P_r : Tekanan vakum



Gambar 1.3 Definisi skala tekanan

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Sebagai contoh, indeks kavitas dapat dihitung untuk kondisi parameter di bawah ini yaitu dengan menerapkan Persamaan 1.5 dan 1.6:

$$\begin{array}{lll}
 T_c=10^\circ\text{C} & P_a=101,0 \text{ kPa} & P_g=9,8 \text{ kPa (1,0 kolom air)} \\
 P_v=1,23 \text{ kPa} & v=30,0 \text{ m/s} & \rho=999,7 \text{ kg/m}^3
 \end{array}$$

$$\sigma = \frac{(101,0 + 9,8 - 1,23) \times 10^3}{999,7 \left(\frac{(30)^2}{2} \right)} = 0,244$$

Tabel 1.1 Nilai masa jenis air, tekanan uap, dan viskositas air sebagai fungsi temperatur

Temperature °C	Density kg/m ³	Vapor pressure kPa	Kinematic viscosity m ² /s × 10 ⁶
0	999.868	0.61	1.787
5	999.992	0.87	1.519
10	999.726	1.23	1.307
15	999.125	1.70	1.140
20	998.228	2.33	1.004
25	997.069	3.16	0.893
30	995.671	4.23	.801
35	994.055	5.62	.724
40	992.238	7.38	.658
45	990.233	9.58	.602
50	988.052	12.3	.553
60	983.20	19.9	.475
70	977.77	31.1	.413
80	971.80	47.3	.365
90	965.31	70.1	.326
100	958.36	101.3	.294

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Dalam situasi praktis, kondisi aliran tidak selalu cocok seperti yang ditampilkan pada Gambar 1.2. Misalnya, untuk aliran pada dasar berundak (*bluff body*) dalam lapisan batas, definisi indeks kavitas tergantung pada lokasi rujukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.4. Dalam kasus ini, tiga lokasi rujukan yang berbeda dicatat, tiga lokasi dan yang berhubungan dengan indeks kavitas adalah:

a. Lokasi yang jauh dari hulu dan di luar pengaruh lapisan batas

$$\sigma_u = \frac{P_u - P_v}{\rho v_u^2 / 2} \quad (1.8)$$

b. Lokasi di dekat hulu dan pada ketinggian maksimum dari *offset*

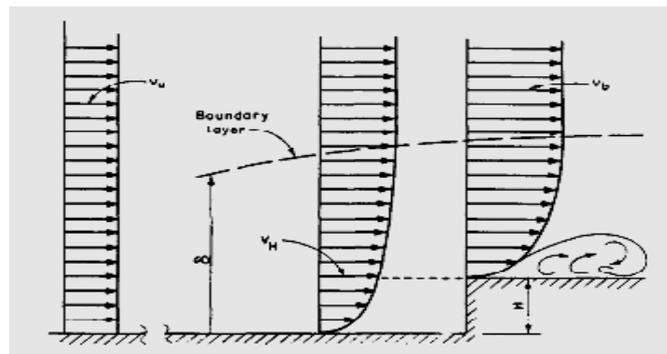
$$\sigma_h = \frac{P_h - P_v}{\rho v_h^2 / 2} \quad (1.9)$$

c. Lokasi di luar lapisan batas dan dalam bidang *offset*

$$\sigma_b = \frac{P_b - P_v}{\rho v_b^2 / 2} \quad (1.10)$$

Keterangan:

- P_h : Tekanan dalam aliran di lokasi yang datar di luar *offset*
- P_u : Tekanan dalam aliran di hulu awal terjadinya lapis batas
- P_v : Tekanan uap air
- v_h : Kecepatan aliran di puncak *offset*
- v_u : Kecepatan aliran di hulu dimulainya lapis batas
- v_b : Kecepatan aliran di lokasi datar di luar *offset*



Gambar 1.4 Rujukan mengenai definisi kecepatan aliran

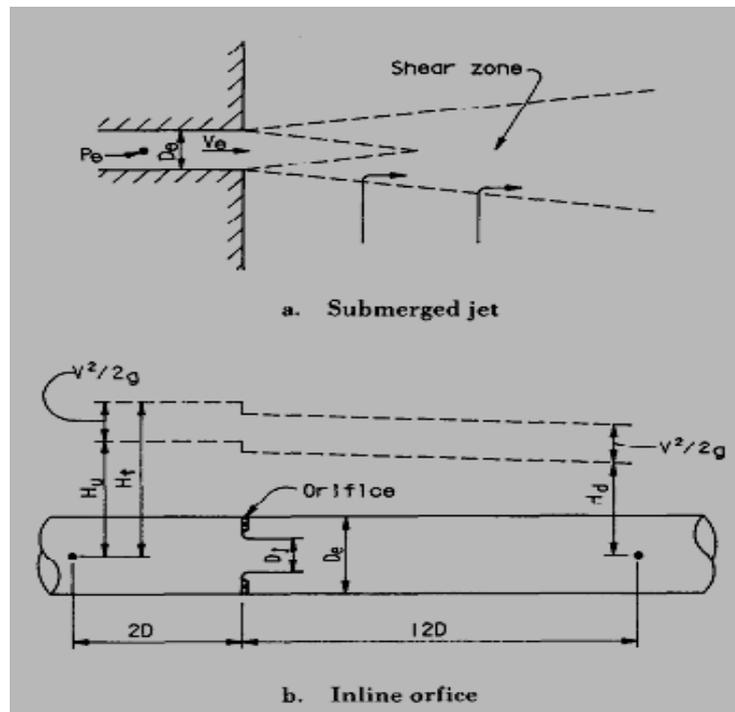
Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Pada aliran di dalam pipa menggunakan *orifice*, beberapa bentuk parameter kavitasi telah diusulkan. Masing-masing didasarkan pada kondisi rujukan (*reference*) yang mudah diukur. Sebagai contoh, indeks kavitasi untuk aliran *jet* yang terendam, σ_j , disajikan pada Gambar 1.5a, adapun persamaannya adalah:

$$\sigma_j = \frac{P_e - P_v}{\rho v_e^2 / 2} \quad (1.11)$$

Keterangan:

- P_e : Tekanan aliran di pusat *jet*
- v_e : Kecepatan aliran di pusat *jet*



Gambar 1.5 Kondisi-kondisi rujukan untuk aliran geser

Dirujuk dari "Cavitation in Chute and Spillways" yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Pada aliran yang melalui pintu, katup, atau lubang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.5b, dalam menentukan aliran rujukan dan kecepatan aliran sering

mendapatkan kesulitan. Pada kasus ini, bentuk lain dari indeks kavitas adalah, K_t , persamaan ini disarankan oleh Ball (1957) yaitu:

$$K_t = \frac{H_d - H_v}{H_t - H_d} \quad (1.12)$$

Keterangan:

- H_d : Tinggi tekanan di hilir katup
- H_t : Tinggi tekanan total di hulu katup
- H_v : Tekanan uap yang relatif terhadap tekanan atmosfer
- H_u : Sama dengan tinggi tekanan total di hulu katup

Bentuk alternatif dari persamaan ini adalah:

$$K_r = \frac{H_d - H_v}{H_u - H_d} \quad (1.13)$$

Ekspresi ini dapat ditunjukkan berkaitan dengan persamaan 1.11 berdasarkan:

$$K_t = \frac{\sigma_j + 1 - C_b - (A_j / A_0)^2}{(A_j / A_0)^2 + C_b} \quad (1.14)$$

$$K_r = \frac{\sigma_j + 1 - C_b - (A_j / A_0)^2}{C_b} \quad (1.15)$$

Keterangan:

- A_0 : Luas di hulu pipa secara *cross sectional*
- C_b : Koefisien kehilangan oleh Borda $(H_u - H_d) / (V_e^2 / 2g)$

Dalam persamaan ini, kehilangan energi antara bagian hulu dan *vena contracta* diabaikan. Indeks kavitas tidak menjelaskan banyak kompleksitas kavitas, namun demikian parameter ini sangat berguna untuk menunjukkan keadaan kavitas dalam struktur hidraulik. Sebagai contoh, pada aliran tiba-tiba yaitu suatu

aliran yang melalui *offset*, maka kavitasi tidak akan terjadi jika indeks kavitasi lebih besar dari 1,8, seperti ditunjukkan dalam Gambar 6 di bawah.

1.3 Formasi Kavitasi

1.3.1 Teori

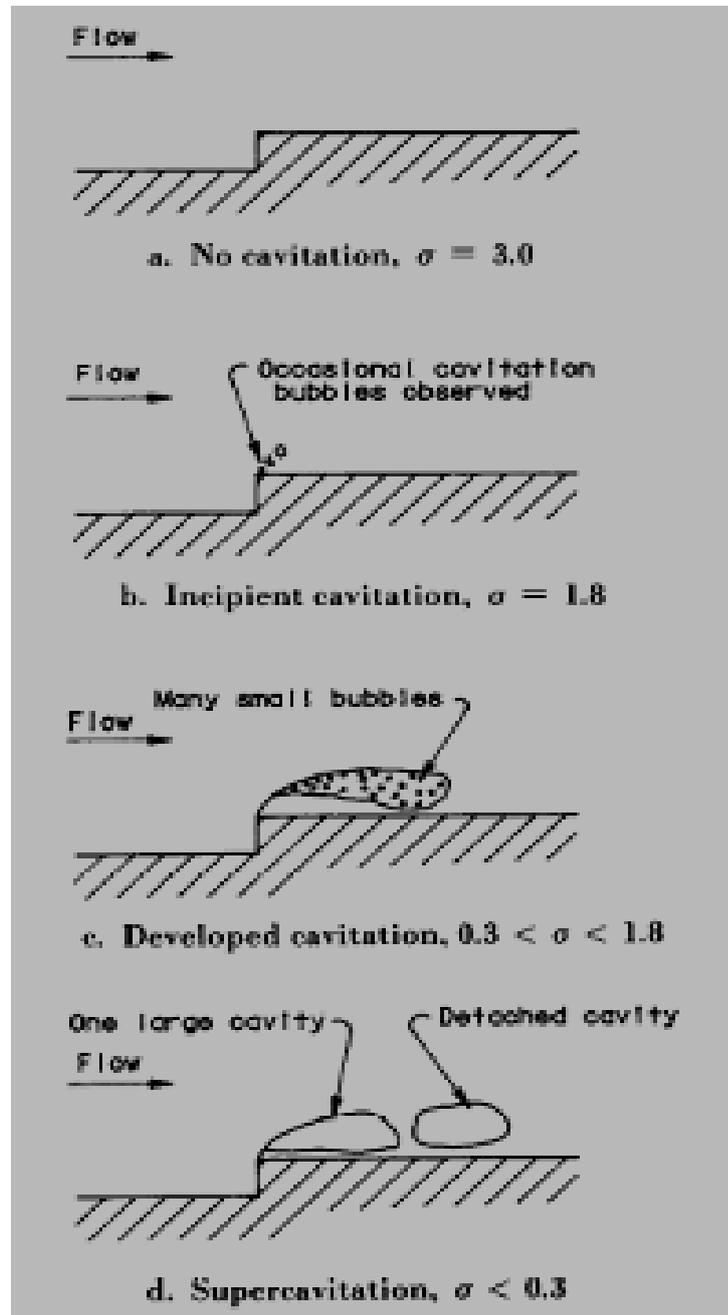
Air tidak dapat secara spontan berubah dari cairan ke uap air, namun harus melalui suatu proses yaitu berupa peningkatan suhu atau dengan cara menurunkan tekanannya. Air yang telah disuling dan disaring berkali-kali dapat mempertahankan tekanan negatif yang sangat besar tanpa kavitasi. Kavitasi dan proses mendidihnya air adalah dua gejala yang dapat diamati yang ditandai oleh timbulnya suara berisik di dalam panci pemanas. Proses kavitasi menjadi sesuatu yang tidak dikenali jika di dalam panci pemanas terdapat kotoran berupa partikel-partikel sedimen di dalamnya. Katz (1984) telah melakukan pengamatan pada air yang mengalir dan menemukan bahwa gejala kavitasi diawali oleh adanya gelembung uap air yang berukuran kecil, dan berjumlah sedikit yang selanjutnya berkembang menjadi banyak. Keberadaan gelembung uap air yang berukuran kecil sebagai tanda awal dimulainya kavitasi telah diketahui sejak lama bahkan telah dijelaskan oleh beberapa teori.

Stabilitas gelembung berbentuk bola telah dipelajari oleh Daily dan Johnson (1956). Kekuatan-kekutan yang ditunjukkan oleh panah dalam gambar setengah bola dari suatu gelembung itu saling menyeimbangkan yang ditunjukkan dalam Gambar 7. Pada gelembung yang berisi uap air persamaannya menjadi seperti tersaji di bawah ini.

$$\pi r^2 (P_v + P_p) = 2\pi r \varepsilon + \pi r^2 P_0 \quad (1.16)$$

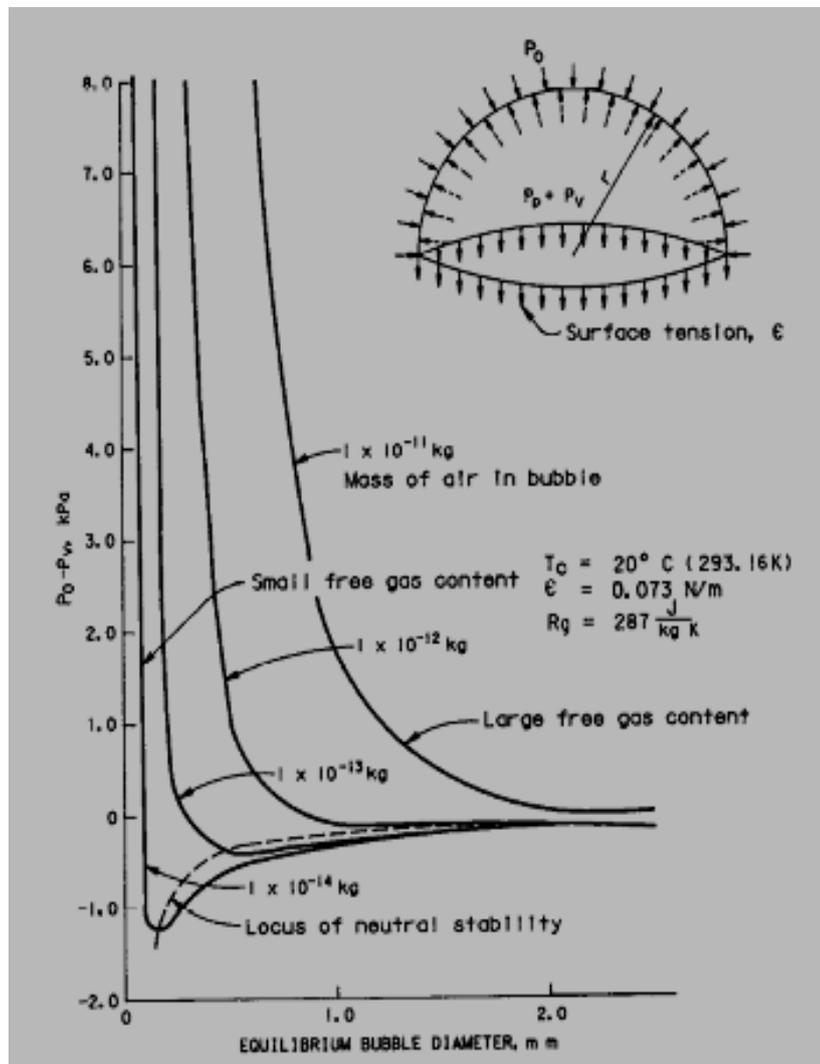
$$P_v + P_p = \frac{2\varepsilon}{r} + P_0$$

(1.17)



Gambar 1.6 Perkembangan kavitasi

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).



Gambar 1.7 Kondisi kesetimbangan untuk gelembung uap air yang berisi air

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Keterangan:

- r : Jari-jari gelembung udara
- P_0 : tekanan referensi
- P_p : Tekanan parsial gas
- P_v : Tekanan uap air
- π : 3,14159

Dengan asumsi gas dalam gelembung mematuhi aturan yang sempurna mengenai hukum gas:

$$P_p = \frac{n_m R_u T_k}{v_g} = \frac{n_m R_u T_k}{\pi r^3} = \frac{m R_g T_k}{\pi r^3} \quad (1.18)$$

Keterangan:

- m : Masa gas
- n_m : Angka mole = m/M
- M : Masa 1 mole dari gas
- R_g : Konstanta gas engineering untuk udara
- R_u : Konstanta gas universal
- T_k : Temperatur mutlak (Kelvin)
- v_g : Volume gas

Persamaan 1.17 berubah menjadi:

$$P_0 - P_v = \frac{A_g}{r^3} - \frac{2\varepsilon}{r} \quad (1.19)$$

A_g adalah konstanta

$$A_g = m R_g \frac{T_k}{\pi}$$

Persamaan 1.19 memberikan solusi dari dari berbagai kumpulan sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 1.7 di atas.

Kurva-kurva ini mewakili kondisi keseimbangan untuk gelembung uap air berisi udara. Stabilitas dari gelembung itu dapat diselidiki dengan pengujian persamaan diferensial dari gelembung itu (Knap *et all*, 1970). Persamaan itu adalah:

$$\pi \left[r \frac{d^2 r}{d_t^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{d_r}{d_t} \right)^2 \right] = - \left(P_0 - P_v + \frac{2\varepsilon}{r} - \frac{A_g}{r^3} \right) \quad (1.20)$$

Jika sisi kanan Persamaan 1.20 adalah positif, gelembung itu akan bertambah ukuran diameternya. Sebaliknya, jika sisi kanan persamaan adalah negatif, gelembung itu diameternya akan berkurang. Dengan demikian, sisi kanan persamaan mewakili satu kekuatan yang menyebabkan ukuran gelembung itu berubah. Stabilitas gelembung itu ditentukan oleh tanda secara aljabar terutama pada sisi kanan persamaan. Kondisi netral stabil terjadi ketika di sisi kanan Persamaan 1.20 sama dengan nol. Kurva ini, ditunjukkan di Gambar 1.7, yang didefinisikan sebagai:

$$P_d = P_0 - P_v = -\frac{4}{3} \left(\frac{\varepsilon}{r_c} \right) \quad (1.21)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} P_d & : \text{Perbedaan antara tekanan aliran minimal dan tekanan uap air} \\ r_c & : \text{Radius kritis} = \frac{3}{2} \left(\frac{mR_g T_k}{\pi \varepsilon} \right) \end{aligned}$$

Pengembangan teoritis ini menyediakan kedalaman pengertian mengenai proses mekanik dari pembentukan kavitasi. Sebagai contoh, jika satu gelembung berisi gas bebas yang kecil yang dikonveksikan ke dalam satu daerah yang bertekanan rendah, maka garis tengah gelembung itu akan konstan. Bagaimanapun, jika tekanan turun hingga mencapai suatu nilai yang cukup bagi gelembung itu untuk menjangkau radius kritis, maka ukuran gelembung itu akan meningkat secara cepat yang akhirnya meledak. Perluasan yang cepat hanya mungkin terjadi melalui penguapan dari air yang mana sumbangan dari perluasan gas itu adalah kecil. Karena itu, proses di atas adalah kavitasi uap.

Sebaliknya, jika satu gelembung berisi gas bebas yang besar yang dikonveksikan ke dalam satu daerah yang bertekanan rendah, garis tengah gelembung itu akan secara terus menerus memperluas diri tanpa pernah mencapai suatu radius yang

kritis. Pada kasus ini, perluasan gelembung itu terutama disebabkan oleh perluasan gas tersebut. Pertumbuhan noneksplosif gelembung pada tekanan uap tidak akan pernah dicapai merupakan karakteristik kavitasi gas.

1.3.2 Verifikasi Empirik

Satu teori mestinya tidak hanya menyediakan kedalaman pengertian tentang mekanika dalam satu peristiwa, tetapi harus juga secara eksperimen dapat dilakukan. Holl (1960), mempunyai inisiatif mengenai pengaruh gelembung udara secara empirik terhadap kavitasi dengan cara menulis ulang Persamaan 1.17 di dalam persamaan sebagai berikut:

$$\frac{P - P_v}{\rho V_0^2 / 2} = \frac{P - P_0}{\rho V_0^2 / 2} + \frac{\alpha \beta}{\rho V_0^2 / 2} - \frac{2\varepsilon / r}{\rho V_0^2 / 2} \quad (1.22)$$

Keterangan:

- P : Tekanan (gelembung mulai menurun ukurannya)
- α : Koefisien hukum Henry's
- β : Konsentrasi gas

Dalam membandingkan Persamaan 1.22 dengan Persamaan 1.3 dan 1.5, diketahui bahwa:

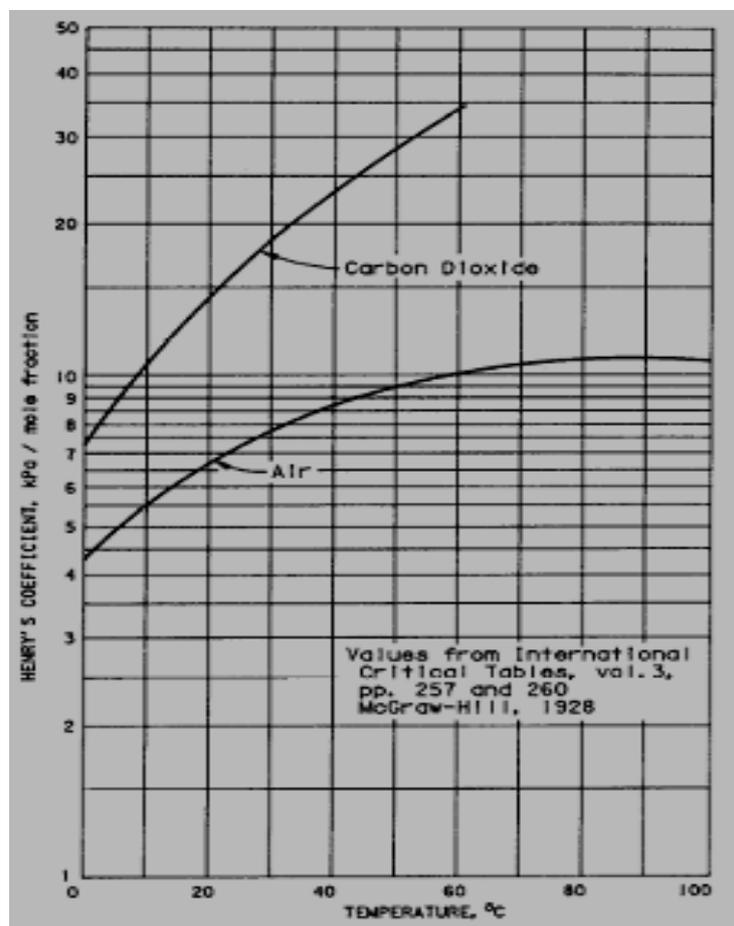
- a. Syarat pertama berpasangan dengan σ ,
- b. Syarat yang kedua berpasangan dengan C_p ,
- c. Syarat yang ketiga mewakili efek dari gas tersebut di dalam gelembung, dan,
- d. Syarat yang keempat mewakili efek tegangan permukaan.

Di Persamaan 1.22, sebagian tegangan dari gas di dalam gelembung telah digantikan oleh tekanan jenuh dari gas tersebut. Pada konsentrasi gas yang kecil,

kejenuhan atau sebagian tegangan dari gas itu dijelaskan oleh hukum Henry sebagai berikut:

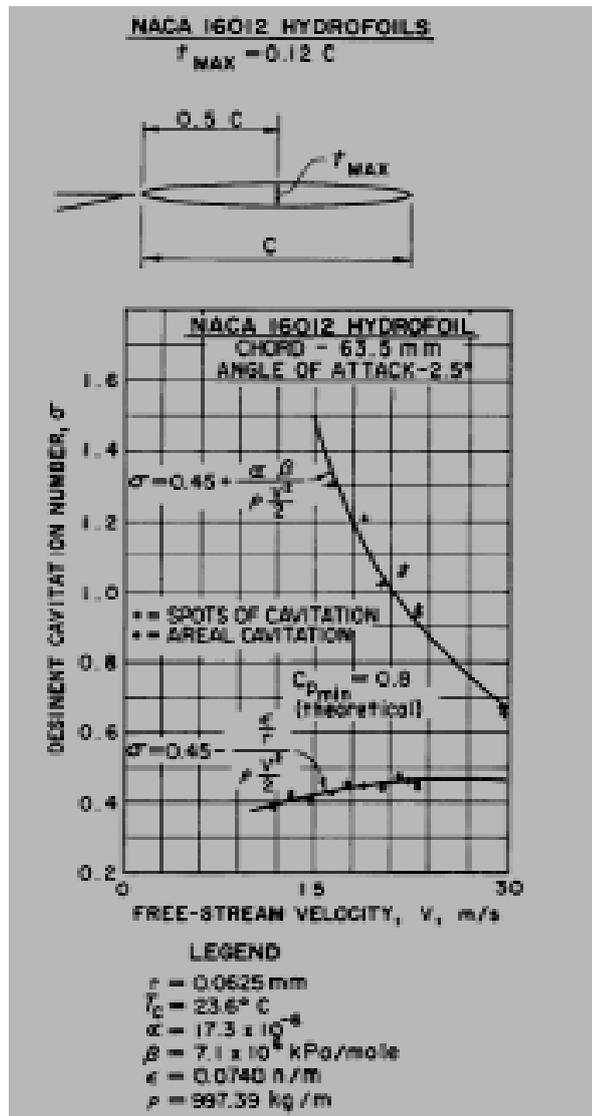
$$P_s = \alpha\beta \quad (1.23)$$

Nilai koefisien hukum Henry merupakan fungsi dari gas dan suhu air seperti yang tersurat dalam Gambar 1.8. Koefisien itu dinyatakan dalam arti tekanan per fraksi mol. Fraksi mol itu digambarkan sebagai banyaknya mol pada setiap gas dari setiap zat yang terlarut.



Gambar 1.8 Koefisien hukum Henry's

Dirujuk dari "Cavitation in Chute and Spillways" yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).



Gambar 1.9 Pengaruh kecepatan aliran terhadap kavitasi gas yang poros

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Holl (1960), menemukan persetujuan yang baik antara gejala kavitasi yang diramalkan oleh Persamaan 1.22 dan permulaan kavitasi di satu hidrofoil untuk konsentrasi udara antara 7 dan 17 mol udara per juta mol air. Satu contoh dari uji itu adalah penyelidikan di satu hidrofoil seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1.9. Uji kecepatan mempunyai rentang antara 12 dan 23 meter per second. Garis

tengah gelembung yang diamati kira-kira sekitar 0.25 milimeter. Titik-titik itu menandakan luasan kavitasi yang berkaitan berpasangan dengan kavitasi uap. Titik-titik itu menandakan noda kavitasi yang mana gelembung-gelembung individu di permukaan hidrofoil yang berkaitan dengan kavitasi gas. Untuk hidrofoil ini, bilangan Euler minimum teoritis adalah 0,8. Uji terhadap data yang ada mengindikasikan bahwa nilai indeks kavitasi adalah 0,45. Perbedaan antara dua nilai di atas tidak diketahui.

Besaran gas dan tegangan permukaan dimasukkan ke dalam Persamaan 1.22 serta arti penting hasil eksperimen yang dilakukan oleh Holl disajikan dalam Tabel 1.2. Indeks kavitasi dihitung menggunakan persamaan 1.22 dan nilai minimum bilangan Euler diobservasi melalui eksperimen. Konsentrasi udara bukan merupakan parameter yang penting bagi kavitasi demikian juga dengan tegangan permukaan bukan merupakan parameter yang penting bagi kavitasi gas.

Tabel 1.2 Pengaruh tegangan permukaan dan udara terhadap indeks kavitasi permulaan

Temperature, °C		23.6	
Henry's coefficient, kPa/mole fraction		7.1×10^6	
Air concentration, mole fraction		17.3×10^{-6}	
Water density, kg/m ³		997.39	
Surface tension, N/m		0.0740	
Bubble radius, mm		0.0625	
Mass of gas in bubble, kg		1.1×10^{-15}	
Minimum Euler number		0.45	
Velocity, m/s		15.0	30.0
dissolved gas effects	$\frac{\alpha\beta}{\rho V_o^2/2}$	0.85	0.212
cavitation index for gaseous cavitation		1.30	0.66
surface tension effects	$\frac{2\epsilon/r}{\rho V_o^2/2}$	-0.048	-0.005
cavitation index for vaporous cavitation		0.402	0.445

Dirujuk dari "Cavitation in Chute and Spillways" yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

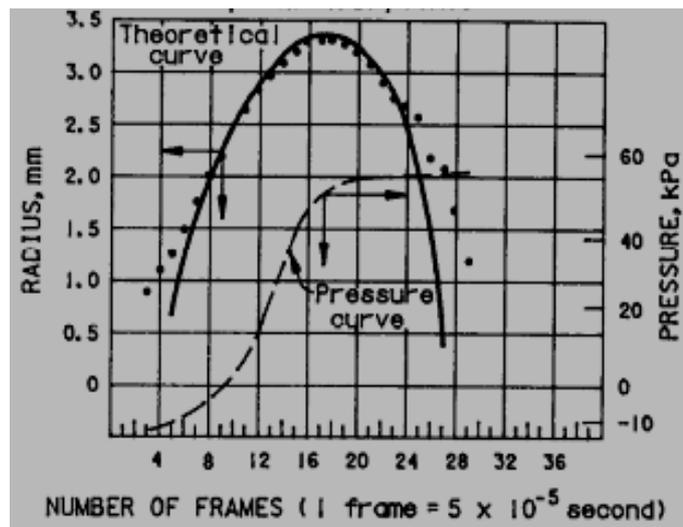
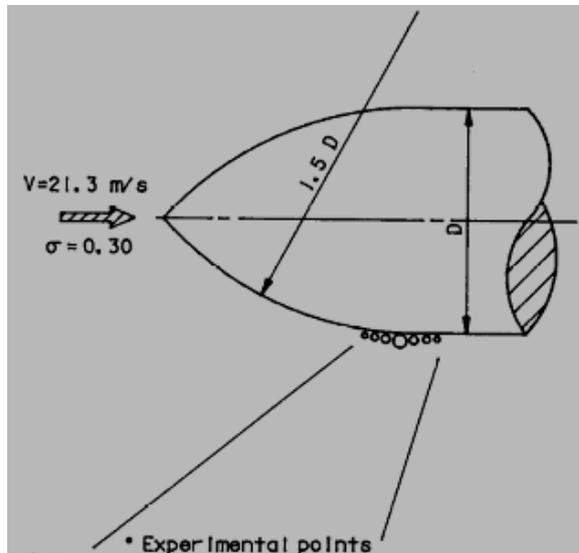
Eksperimen dari Holl (1960) menunjukkan bahwa besaran dari kecepatan aliran dan konsentrasi udara mempunyai pengaruh yang besar terhadap terjadinya kavitasi. Makna penting adalah bahwa penelitian model mampu meramalkan secara teliti potensi kavitasi di aliran di dalam prototip, penelitian model sebaiknya dilakukan menggunakan parameter kecepatan aliran yang tinggi serta pada saat gelembung udara pecah.

Persyaratan mengenai aliran berkecepatan tinggi mempunyai makna bahwa bilangan Euler dan Reynold harus sangat besar yang mana kondisi ini tidak dapat dilakukan pada saluran tertutup. Pada kondisi yang hampir sama, bilangan Froude yang besar tidak mungkin tercapai untuk model di saluran terbuka apalagi jika dituntut hasil simulasi yang akurat pada peristiwa kavitasi.

Pengaruh konsentrasi udara dan tegangan permukaan terhadap indeks kavitasi adalah faktor empirik yang tidak hanya dapat diverifikasi melalui eksperimen. Plesset (1949) menyelidiki perubahan ukuran satu gelembung karena kavitasi pada saat gelembung menyelusup melalui gradien tekanan sebagaimana ditunjukkan di dalam Gambar 1.10. Teori seperti yang dinyatakan oleh Persamaan 1.20, mampu meramalkan bahwa pertumbuhan gelembung udara akan berjalan secara baik.

1.3.3 Dinamika Pecahnya Gelembung Udara

Pada bagian sebelumnya, pertumbuhan dari gelembung udara telah diakui berdasarkan teori yang menggunakan asumsi bahwa air tidak dapat dimampatkan. Sebagai tambahan, tekanan uap, tegangan permukaan, dan suhu semua dianggap konstan. Pada kenyataannya, proses pecahnya gelembung udara yang selanjutnya tumbuh menjadi banyak merupakan asumsi yang tidak sah. Simulasi proses pecahnya gelembung udara menjadi banyak berdasarkan sifat air yang tidak dapat dimampatkan serta fakta bahwa sifat gas adalah wujud yang dapat dimampatkan. Pertimbangan-pertimbangan ini menghasilkan enam persamaan diferensial dan empat persamaan aljabar yang harus diselesaikan secara bersama-sama.

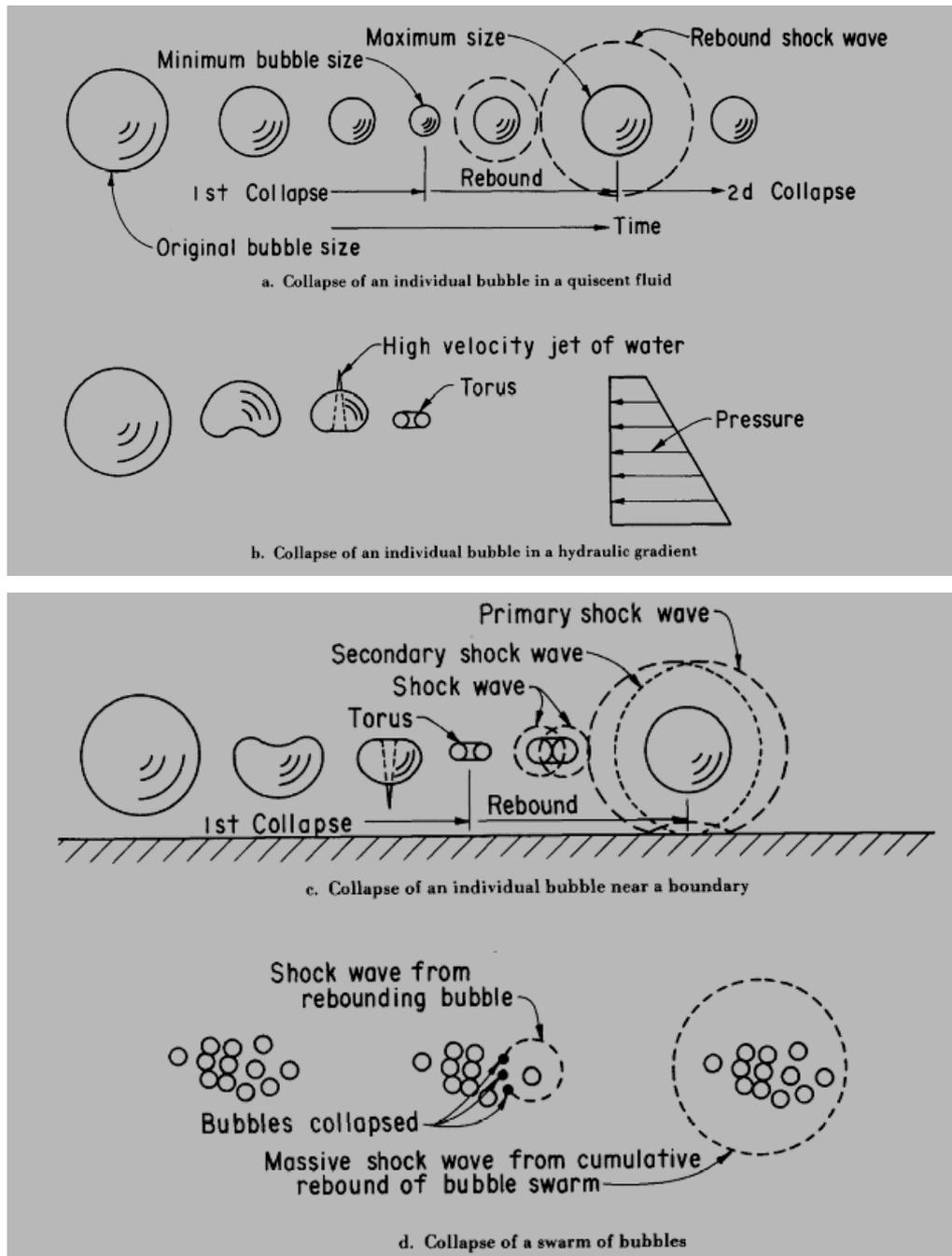


Gambar 1.10 Sejarah gelembung pada aliran disekeliling ogive yang memiliki ukuran 1,5 diameter

Dirujuk dari "Cavitation in Chute and Spillways" yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Penyelesaian numerik dari persamaan yang disebutkan di atas, mengungkapkan bahwa pecahnya gelembung udara dimulai dari berkurangnya diameter gelembung udara sehingga mencapai nilai minimal, selanjutnya gelembung udara tersebut tumbuh dan bergerak memantul seperti yang ditunjukkan dalam Gambar

1.11. Proses di atas diulang berkali-kali dalam beberapa siklus, yang mana dalam setiap siklus selalu diawali dengan berkurangnya diameter gelembung sehingga menjadi gelembung mikroskopis dan mempunyai jumlah yang banyak.



Gambar 1.11 Mekanisme proses pecahnya gelembung

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Selama fase pantulan terjadi, maka terbentuklah gelombang pukulan yang memiliki kecepatan sangat tinggi. Kecepatan gelombang pukulan yang dimulai dari titik tengah diameter gelembung mempunyai besaran yang setara dengan kecepatan suara di dalam air. Asumsi bahwa air adalah wujud yang dapat dimampatkan, Hikling dan Pleset (1964) menemukan bahwa intensitas pukulan gelombang bervariasi terhadap jarak dari titik tengah peledakan gelembung udara. Jarak adalah dua kali diameter awal gelembung udara dari titik tengah peledakan gelembung udara, yang mana intensitas tekanannya sekitar 200 kali dari lokasi peledakan gelembung udara. Di bawah ini disajikan ilustrasi mengenai metode prakiraan besarnya tekanan karena peledakan gelembung udara.

Diasumsikan bahwa diameter gelembung adalah 0,1 mm serta kedalaman aliran adalah 2,0 m, selanjutnya:

$$\begin{aligned}
 \text{Water pressure} &= 2.0 \text{ m } (999 \text{ kg/m}^3) 9.8 \text{ m/s}^2 \\
 &= 19\,580 \text{ Pa} \\
 \text{Ambient pressure} &= \text{water pressure} + \text{barometric} \\
 &\quad \text{pressure} \\
 &= 19.58 \text{ kPa} + 101.3 \text{ kPa} \\
 &= 120.9 \text{ kPa} \\
 \text{Pressure intensity 0.1 mm from collapse center} &= 200 \times 120.9 \text{ kPa} \\
 &= 24\,200 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

Perhitungan-perhitungan ini mengabaikan efek dari garis tengah gelembung awal dan suhu air pada saat tekanan yang menyebabkan gelembung udara meledak (*collapse pressure*). Fujikawa dan Akamatsu (1980), menunjukkan kedua parameter di atas mempunyai pengaruh yang signifikan. Mereka menemukan bahwa tekanan yang menyebabkan gelembung udara meledak dapat meningkatkan garis tengah gelembung awal atau menurunkan suhu air.

Teori memberikan Taksiran waktu bagi satu gelembung itu pecah telah diprakirakan oleh beberapa teori. Waktu gelembung itu pecah, τ , dapat didekati menggunakan persamaan di bawah ini:

$$\tau = R_0 \left(\frac{\rho}{P_0} \right)^{1/2} \quad (1.24)$$

Keterangan:

- P_0 : Tekanan rujukan
- R_0 : Diameter awal gelembung
- ρ : Rapat masa air

Pada satu gelembung yang mempunyai garis tengah awal sebesar 0,1 milimeter dalam kondisi mendapatkan tinggi tekanan sama dengan 2.0 meter air, maka waktu terjadinya gelembung pecah adalah:

$$\tau = 0.0001 \left(\frac{999}{120\ 900} \right)^{1/2} = 9.1 \text{ microseconds}$$

Mekanisme gelembung pecah berbentuk bola dipengaruhi oleh banyak faktor. Sebagai contoh, jika satu gelembung pecah menjadi beberapa gelembung yang diakibatkan oleh karena gradien tekanan, maka bentuk gelembung itu tidak selalu simetrik. Pada bidang yang tenggelam akan memperoleh tekanan di seluruh sisi-sisinya. Jika gelembung itu pecah di dekat lapisan batas, maka lapisan batas itu menghalangi aliran ke arah gelembung yang menyebabkan gelembung-gelembung itu menjadi tidak simetris. Kedua kasus menyebabkan satu sisi dari gelembung itu berubah bentuk karena adanya penetrasi jet pada sisi gelembung tersebut sebagaimana dilukiskan di dalam Gambar 1.11. Jet yang dibentuk oleh pecahnya gelembung tunggal tak simetris disebut *microjet*. Kecepatan *microjet* adalah sangat tinggi. Hammitt (1979) menyimpulkan bahwa dalam banyak kasus kerusakan karena kavitasi mempunyai dampak permukaan dasar atau dinding saluran curam. Penelitian menggunakan metode *photoelastic* yang terakhir (Fujikawa dan Akamatsu, 1980), telah menunjukkan bahwa gelombang udara bergerak sangat cepat selanjutnya menghasilkan dorongan tekanan jauh lebih

tinggi dibanding *jet* yang selanjutnya membentur dinding dasar dan samping saluran lurus.

Jika terdapat lebih dari satu gelembung di dalam aliran, maka gelembung yang pertama pecah tersebut akan menghasilkan gelombang udara yang bergerak cepat serta menyebar kepada gelembung lainnya. Gelombang udara yang bergerak cepat ini akan menyebabkan gelembung-gelembung berdekatan pecah secara mendadak dan ukurannya tidak simetris. Tekanan *jet* yang dibentuk oleh proses pecahnya gelembung tak simetris di atas yang disebabkan oleh gelombang udara yang bergerak cepat itu disebut *ultrajet*. Kecepatan gelombang yang dihasilkan oleh *ultrajets* menyerupai kecepatan bunyi di dalam aliran *sonic velocity* (Tomita dan Shima, 1986). *Ultrajets* menghasilkan intensitas tekanan lebih tinggi dibanding gelombang udara yang bergerak cepat berbentuk bola atau *microjets*.

Namun, teori tidak mampu meramalkan besaran tekanan yang dihasilkan oleh proses pecahnya satu gelembung yang diikuti oleh proses pecahnya gelembung-gelembung lainnya. Satu hipotesis yang dapat diajukan: jika satu gelembung pecah yang diikuti oleh gelembung-gelembung lainnya, maka gelombang udara yang bergerak cepat itu menghasilkan selama pantulan balik yang akan menyebabkan gelembung-gelembung lain yang berdekatan itu pecah. Proses itu akan berlanjut dalam bentuk reaksi berantai sampai dengan sisa gelembung pecah secara serempak. Satu sintesis yang logis bahwa proses pecahnya gelembung secara bersama-sama akan menghasilkan intensitas tekanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan proses pecahnya gelembung secara acak.

Faktor lain yang penting yang mempengaruhi proses pecahnya gelembung dari gejala kavitas adalah adanya pusaran di dalam aliran. Aliran geser menyebabkan pusaran yang dapat mengumpulkan gelembung-gelembung itu di dalam satu koordinat. Aliran geser yang menyebabkan pusaran gelembung yang berkumpul dan mempengaruhi gejala kavitas disajikan dalam Gambar 1.12.

Kerusakan yang disebabkan oleh sekelompok gelembung yang terjebak di poros suatu pusaran menjadi lebih besar jika dibandingkan dengan kavitas dari satu gelembung atau bahkan jika dibandingkan dengan kavitas dari banyak

gelembung. Sebagai contoh, satu gelembung individu mempunyai diameter 2,7 mm dapat mengakibatkan tekanan di plat aluminium dalam wujud cekungan (*dekok*) dengan diameter 0,2 mm. Bagaimanapun, kavitasi terjadi di dalam pusaran dari lapisan geser yang terbentuk karena bukaan sebagian dari pintu air geser, telah menyebabkan tekanan dalam wujud cekungan (*dekok*) sampai dengan 16 mm arah memanjang yang intensitas tekanannya sama dengan 1500 *megapascals* (Lesleighter, 1983).

BAB II

KARAKTERISTIK KAVITASI PADA ALIRAN PERMUKAAN

2.1 Kategori Kekasaran Permukaan

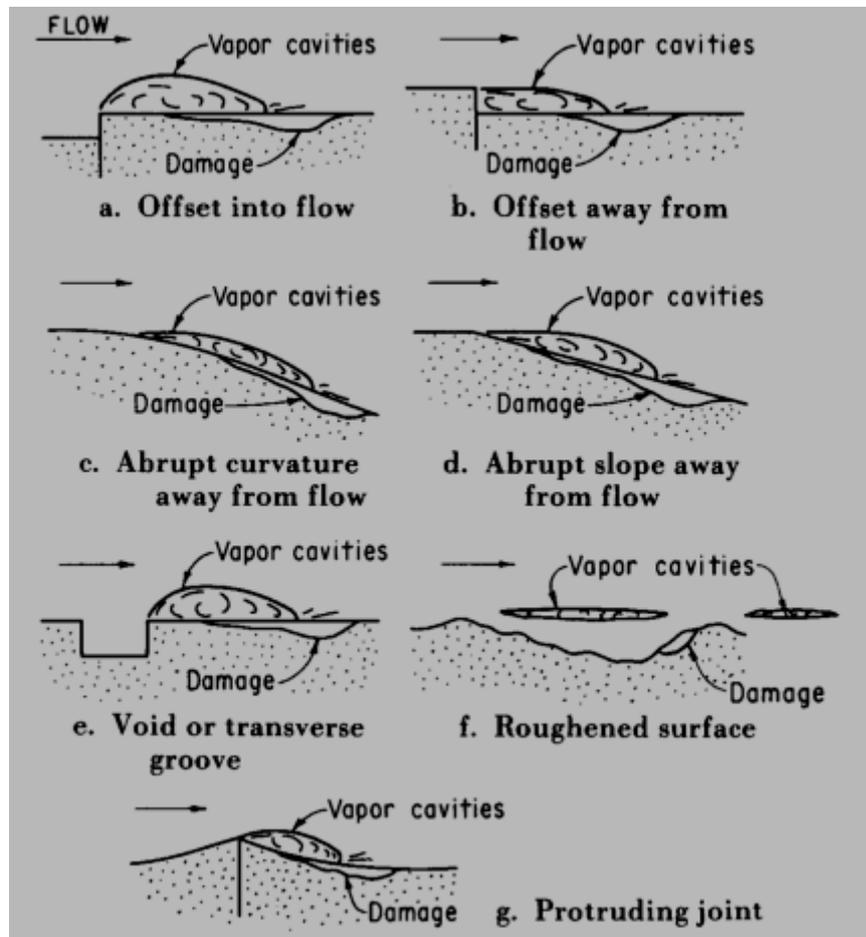
Di tinjau dari sisi struktur permukaan aliran hidraulik, penyimpangan aliran permukaan atau kekasaran permukaan dapat dicirikan menjadi satu dari dua kategori, yaitu (1) kekasaran tunggal (terisolasi) atau (2) kekasaran terdistribusi secara merata. Kekasaran tunggal adalah penyimpangan terhadap permukaan yang relatif besar bentuknya adalah berupa tonjolan di atas permukaan itu. Distribusi kekasaran seragam adalah tekstur permukaan yang tidak mengandung kekasaran tunggal. Diantara dua kategori ekstrem di atas adalah kategori ketinggian moderat dari kekasaran tunggal dalam kombinasi dengan distribusi kekasaran seragam yang belum dipelajari secara sistematis.

Kadang-kadang, kekasaran tunggal disebut sebagai kekasaran lokal. Contoh umum kekasaran di struktur hidraulik, meliputi:

- a. Aliran yang memasuki *offset* atau undak-undakan (arah ke atas), Gambar 2.1 a;
- b. Aliran yang memasuki *offset* atau undak-undakan (arah ke bawah), Gambar 2.1 b, c, d;
- c. Aliran memasuki atau melompati alur, Gambar 2.1 e, dan;
- d. Aliran memasuki puncak tonjolan, Gambar 2.1 g.

Pada semua kasus, kavitasi dibentuk oleh proses turbulensi di zona geser; kavitasi dihasilkan oleh perubahan yang mendadak arah aliran karena ketidakteraturan dasar saluran. Lokasi zona geser dapat diramalkan dari bentuk dan kekasaran

saluran. Berdasarkan bentuk dan kekasaran dasar saluran, gelembung kavitasi akan pecah di dalam aliran atau di dekat lapisan batas aliran.



Gambar 2.1 Elemen kekasaran tipikal yang terisolasi yang ditemukan di struktur hidraulik

Dirujuk dari "Cavitation in Chute and Spillways" yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Gambar 2.1f melukiskan kavitasi karena kekasaran dasar saluran yang bervariasi. Kavitasi terjadi di dalam aliran karena turbulensi yang diakibatkan oleh kekasaran dasar di lapisan batas. Lokasi kavitasi tidak dapat diprediksi; bagaimanapun, kavitasi selalu terjadi di dalam tubuh aliran terutama pada kekasaran dasar saluran yang bervariasi.

Bab ini menampung kumpulan karakteristik kavitas pada berbagai tipe dan variasi kekasaran dasar saluran. Pada beberapa atau sebagian besar penelitian menemukan hubungan antara kavitas dengan tipe atau variasi kekasaran dasar saluran. Berdasarkan hasil penelitian ditemukan bahwa pengikisan permukaan beton di dasar saluran diakibatkan oleh kavitas. Hasil penelitian ini memberikan gambaran tentang kebutuhan akan penelitian lanjut untuk mengungkapkan bagaimana hubungan antara kekasaran dasar saluran untuk berbagai tipe dan variasi terhadap kavitas.

Aliran melalui lengkung cembung yang mengandung kekasaran tunggal memiliki karakteristik kavitas yang berbeda dibandingkan dengan aliran yang melalui dasar datar. Oleh karenanya dibutuhkan satu metode untuk memprakirakan karakteristik kavitas pada aliran yang memiliki dasar saluran yang melengkung cembung. Metoda ini dikenal sebagai asas superposisi.

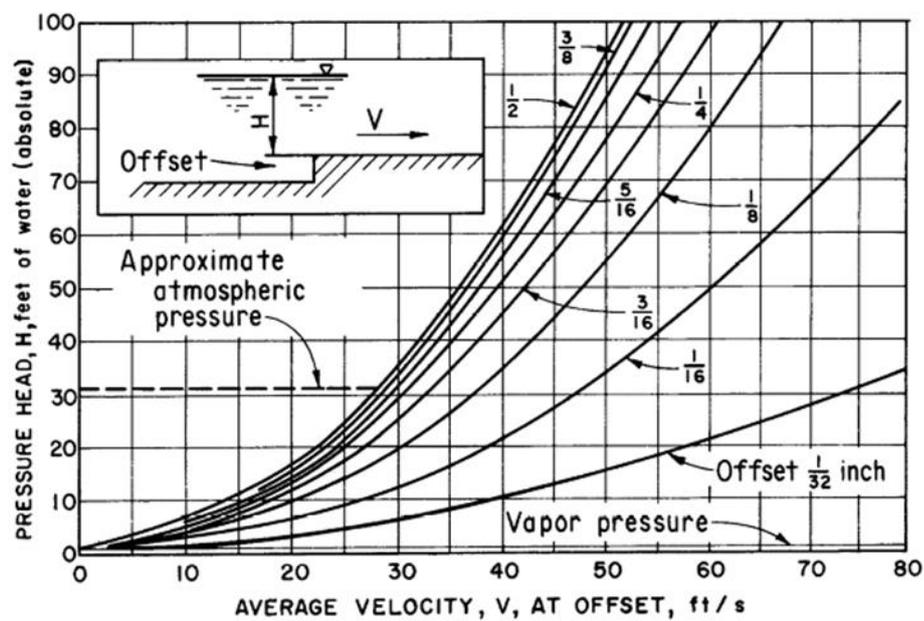
2.2 Kekasaran Bentuk Tunggal

Dua tipe kekasaran dasar saluran yaitu alinyemen yang menyimpang serta ketidakaturan dasar saluran. Alinyemen yang menyimpang baik secara gradual maupun yang mendadak disajikan dalam Gambar (2.1 a, b, c, dan d). Ketinggian alinyemen yang menyimpang mempunyai dimensi yang lebih kecil dibandingkan dengan dimensi panjang dasar saluran. Ketidakaturan dasar saluran mempunyai dimensi yang hampir sama antara tinggi dan panjang dasar saluran (lihat Gambar 2.5). Di bawah ini disajikan indeks kavitas untuk setiap kekasaran dasar saluran yang berbeda.

2.2.1 Aliran Melalui Undakan (*offset*)

Penelitian awal pada dasar saluran yang memiliki kekasaran tunggal, difokuskan pada karakteristik kavitas di alinyemen yang menyimpang. Penelitian di aliran melalui undakan disajikan oleh Colgate dan Elder (1961) seperti ditunjukkan

dalam Gambar 2.2. Data diperoleh dari penelitian yang menggunakan tinggi undakan 102 mm serta lebarnya 152 mm. Lokasi penelitian adalah di sisi hilir aliran yaitu di aliran transisi yang memiliki lapisan batas yang sangat tipis. Pada undakan yang memiliki dimensi besar data yang diperoleh dapat saja salah, karena terdapat efek kemacetan aliran yang tidak diperhitungkan. Koreksi karena kemacetan aliran dalam bentuk kurva dinyatakan dalam bentuk yang lebih ringkas seperti tersaji dalam Gambar 2-2 yang dikemukakan oleh Colgate (1977). Kurva-kurva dalam Gambar 2.2 dibuat menjadi lebih ringkas yaitu dalam bentuk indeks kavitasasi yang merujuk kepada variasi tinggi undakan, menggunakan Persamaan 1.10. Pada tunggal undakan yang mendadak dapat digunakan Gambar 2.3a di bawah ini. Pada undakan yang mempunyai perbandingan antara tinggi dan panjang dalam hal ini lebar undakan kurang dari 5:1, karakteristik kavitasasi merupakan fungsi dari dimensi tinggi undakan. Plot yang hampir sama ditunjukkan dalam Gambar 2.3 b khususnya digunakan untuk undakan yang berbentuk lengkung lonjong.



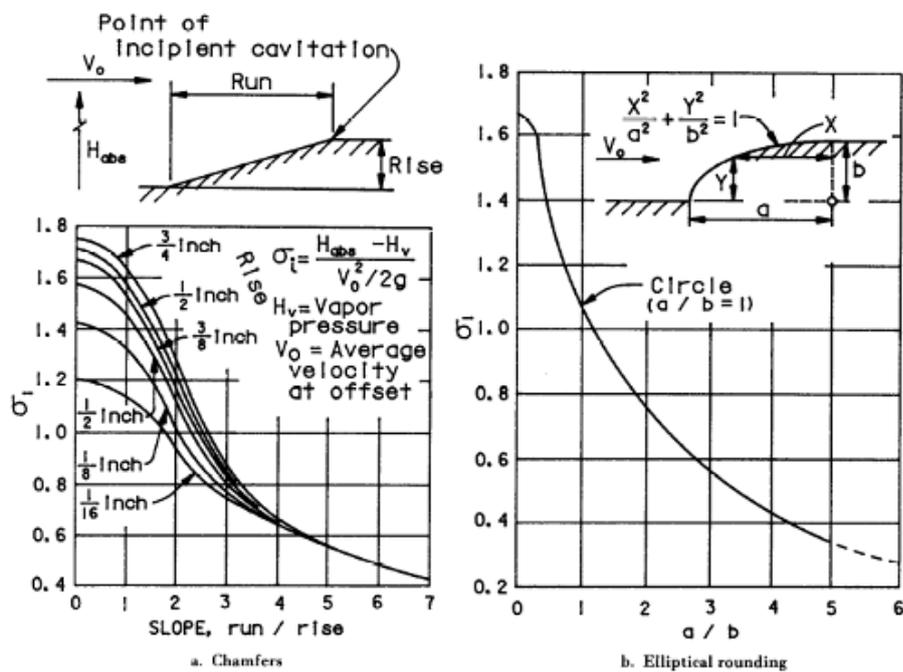
Gambar 2.2 Karakteristik kavitasasi permulaan yang disebabkan oleh undakan (offsets) menurut Colgate dan Elder

Jin, *et al.* (1980) juga melakukan penelitian tentang undakan-undakan di suatu terowongan air. Bagian yang diuji memiliki ukuran 200 x 200 mm yang terletak di hilir terowongan. Penelitian Colgate menemukan bahwa lapisan batas di wilayah ini sungguh tipis. Jin menemukan bahwa indeks kavitasi, σ_i , untuk undakan menggunakan plengsengan (*chamfers*) dapat diekspresikan berdasarkan hubungan empirik di bawah ini, persamaan ini berlaku untuk $L/H > 5,0$:

$$\sigma_i = 1,8 \left(\frac{L_c}{H} \right)^{-0,7} \quad (2.1)$$

Keterangan:

- H : Tinggi undakan
- L_c : Panjang kemiringan undakan (undakan miring)
- σ_i : Indeks kavitasi permulaan



Gambar 2.3 Karakteristik kavitasi permulaan di tepi miring dari undakan miring dan lonjong bundar

Zharov (1978), melakukan eksperimen menggunakan ketebalan lapisan batas sebesar 9 sampai 11 milimeter. Ketinggian undakan yang diuji mulai dari 3, 6, 10, dan 15 mm. Pada saat penelitian menggunakan satu indeks kavitas yang mengacu kepada tingginya undakan, seperti di dalam persamaan 1.9, hasilnya menunjukkan bahwa indeks kavitas tidak terikat pada Angka Reynolds dan ketinggian relatif. Bilangan Reynolds yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kisaran antara 1000 sampai 1000000.

Perbandingan diantara beberapa hasil penelitian (tiga peneliti di atas), seperti tersaji di dalam gambar 2-4 menunjukkan bahwa eksperimen dari Colgate dan Jin saling bersesuaian dan saling melengkapi satu sama lain. Pada undakan yang menggunakan plengsengan (chamfers) berukuran kecil ($L/H < 1$), hasil penelitian Zharov juga bersesuaian dengan Colgate dan Jin. Meskipun demikian, pada undakan yang menggunakan plengsengan (chamfers) yang berukuran besar, karakteristik kavitas diantara ketiga peneliti adalah berbeda. Salah satu alasan hasil penelitian itu berbeda adalah dikarenakan Zharov melakukan penelitian dengan menggunakan ketebalan lapisan batas yang ekstrem.

Metoda lain yang dapat digunakan untuk menghitung indeks kavitas adalah menerapkan distribusi kecepatan aliran di dalam lapisan batas yang didasarkan atas teori *frozen streamline* yang dikemukakan Holl (1960). Holl (1960) mengusulkan hubungan antara indeks kavitas tanpa lapisan batas dengan indeks kavitas dengan lapisan batas, yaitu:

$$\sigma_k = \sigma_u \left(\frac{v_a}{v_u} \right)^2 \quad (2.2)$$

Keterangan:

- v_a : Kecepatan aliran karakteristik
- v_u : Kecepatan aliran rujukan
- σ_k : Indeks kavitas yang didasarkan pada kecepatan aliran di atas undakan
- σ_u : Indeks kavitas tanpa lapis batas

Karakteristik kecepatan aliran adalah kecepatan rerata aliran di atas undakan (*offset*) yang didefinisikan sebagai:

$$v_a = \left(\frac{1}{H} \int_0^H v_y^2 dy \right)^{1/2} \quad (2.3)$$

Keterangan:

- H : Tinggi undakan
- v_y : Kecepatan aliran pada saat y
- y : Garis vertikal koordinat (diukur dari lapis batas)

Pada hukum distribusi kecepatan yang memiliki pangkat seperlima, persamaan 2.2 menjadi:

$$\sigma_k = 0,17 \sigma_u \left(\frac{H}{\delta} \right)^{0,4} \quad (2.4)$$

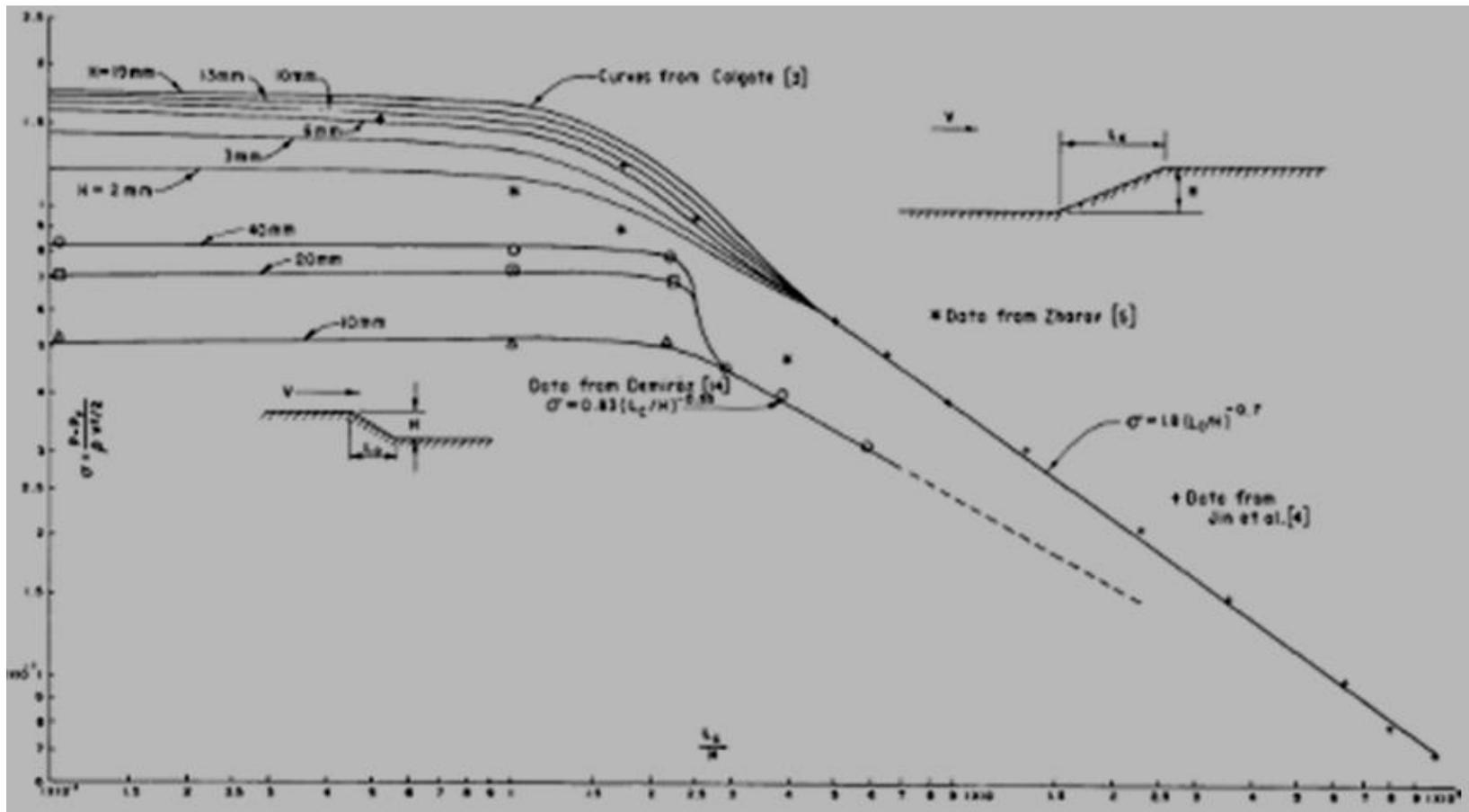
Keterangan:

- δ : Ketebalan lapis batas

Pada saat ketiga penelitian diperbandingkan pada satu kondisi yaitu lapisan batas yang tipis, secara jelas, persamaan 2.4 menunjukkan bahwa data dari Zharov menyimpang terhadap data yang dikemukakan oleh Colgate dan Jin.

Pendekatan yang dilakukan Holl yaitu melakukan eksperimen dengan cara menggunakan kedua teknik yaitu dengan atau tanpa lapisan batas yang selanjutnya diselaraskan menjadi satu dasar prediksi terhadap indeks kavitasi. Sebagai contoh, indeks kavitasi pada lapisan batas yang tipis dapat diramalkan menggunakan persamaan 2.4 dengan cara mengutip data yang berasal dari hasil

eksperimen yang menerapkan lapisan batas. Meskipun demikian, pendekatan ini mampu menghasilkan indeks kavitas yang dapat dipercaya. Karena itu, usaha untuk menentukan besaran indeks kavitas hanya dengan beberapa parameter yang dianggap mewakili yaitu kecepatan aliran di dalam lapisan batas, nampaknya terlalu sederhana.



Gambar 2.4 Karakteristik kavitasi undakan tipe miring

Penelitian lain yang menggunakan metode yang lebih baik untuk menentukan besaran indeks kavitasi yang menerapkan distribusi kecepatan di dalam lapisan batas, hal ini seperti yang dilakukan oleh Arndt et al. (1979). Mereka menyimpulkan bahwa indeks kavitasi merupakan fungsi dari ketebalan relatif dari lapisan batas, bilangan Reynolds dalam aliran, dan besaran faktor bentuk dari lapisan batas. Uraian di atas diwujudkan dalam bentuk persamaan di bawah ini:

$$\sigma_i \propto f\left(\frac{H}{\delta}, R_h, S\right) \quad (2.5)$$

Keterangan:

- R_h : Bilangan Reynolds didasarkan atas ketinggian undakan pada kecepatan aliran bebas
- S : Parameter bentuk lapis batas

Parameter bentuk lapisan batas itu, S , digambarkan sebagai rasio antara ketebalan displacement dengan ketebalan momentum:

$$S = \frac{\delta_d}{\delta_m} \quad (2.6)$$

Ketebalan displacement didefinisikan sebagai:

$$\delta_d = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{v_y}{v_b}\right) dy \quad (2.7)$$

Ketebalan momentum didefinisikan sebagai:

$$\delta_m = \int_0^{\delta} \left(\frac{v_y}{v_b}\right) \left(1 - \frac{v_y}{v_b}\right) dy \quad (2.8)$$

Keterangan:

- v_b : Kecepatan aliran di atas undakan (*offset*)

Pada lapisan batas *fully developed* yang melalui permukaan halus dan datar, parameter bentuk, S , dapat didekati menggunakan Persamaan 1.3.

Hubungan data dari beberapa tipe kekasaran dasar saluran lurus. Persamaan 2.5 diasumsikan memiliki bentuk di bawah ini:

$$\sigma_r = C \left(\frac{H}{\delta} \right)^a \left(\frac{v_b \delta}{\nu} \right)^b \left(\frac{1}{S} \right)^c \quad (2.9)$$

Yang mana ν adalah kekentalan kinematik serta a , b , c dan C adalah koefisien=koefisien yang ditentukan secara eksperimental. Persamaan di atas tidak dapat digunakan untuk menentukan parameter bentuk bagi semua eksperimen yang telah dilakukan oleh Arndt. et. al. (1979). Oleh karena itu, untuk sebagian besar penelitian, hubungan antar data dibentuk dengan cara mengabaikan parameter bentuk serta menggunakan persamaan di bawah ini:

$$\sigma_r = C \left(\frac{H}{\delta} \right)^a \left(\frac{v_b \delta}{\nu} \right)^b \quad (2.10)$$

Nilai dari koefisien itu ditunjukkan di dalam Tabel 2.1 dan Gambar 2.5. Kisaran untuk ketinggian relatif undakan pada undakan dua dimensi adalah sekitar $0.015 < H/6 < 3.4$.

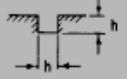
Tingkat kepentingan parameter bentuk lapisan batas dapat dibedakan menggunakan Tabel 2.1 yaitu untuk bentuk segitiga, dan busur lingkaran tak teratur. Dalam dua kasus ini, pengukuran yang memenuhi asas kecukupan dibuat sehingga parameter bentuk lapisan batas itu dapat ditentukan.

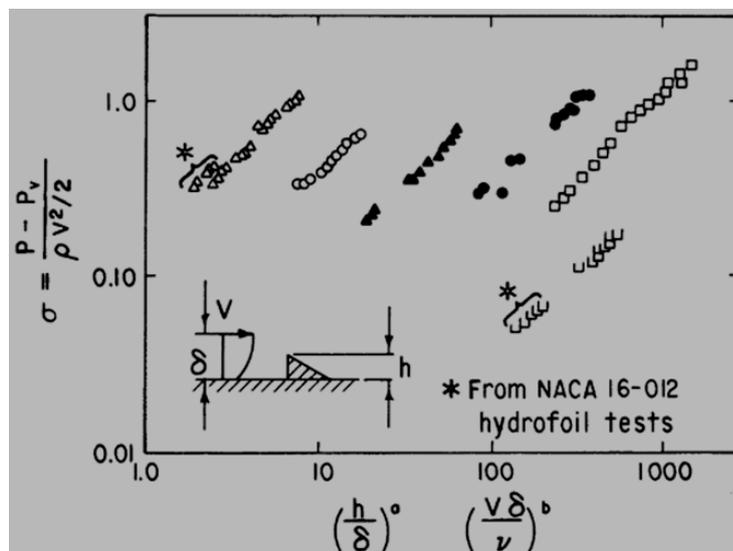
Tabel 2.1 Koefisien ketidakteraturan pada segitiga dan busur lingkaran

Irregularity	a	b	c	C
Triangular	0.361	0.196	-	0.152
	0.40	0.20	0.45	0.182
Circular arc	0.344	0.267	-	0.041
	0.30	0.15	0.70	0.171

Dirujuk dari "Cavitation in Chute and Spillways" yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Pada saat aliran masuk ke dalam aliran yang tak mempunyai alinyemen maka dilarang untuk memasukkan efek dari lapisan batas, hal ini menyebabkan indeks kavitasi cenderung menjadi sangat besar. Jika diinginkan, bagian dari efek lapisan batas dapat didekati dengan menggunakan nilai indeks kavitasi yang diambil dari Gambar-gambar 2.3 b dan 2.4 bersama-sama dengan Persamaan 2.4.

Symbol	Irregularity	Flow dimensions	Data source	a	b	C	
△	Triangles	2	Holl, 1960	0.361	0.196	0.152	
○	Circular arcs	2	Holl, 1960	0.344	0.267	0.041	
▲	Hemispheres	3	Benson, 1966	0.439	0.298	0.0108	
●	Cones	3	Benson, 1966	0.632	0.451	0.00328	
■	Cylinders	3	Benson, 1966	0.737	0.550	0.00117	
⌊	Slots (grooves)	2	Bohn, 1972	0.041	0.510	0.000314	



Gambar 2.5 Karakteristik kavitasi beberapa tipe undakan

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

2.2.2 Lubang Di Lapisan Batas

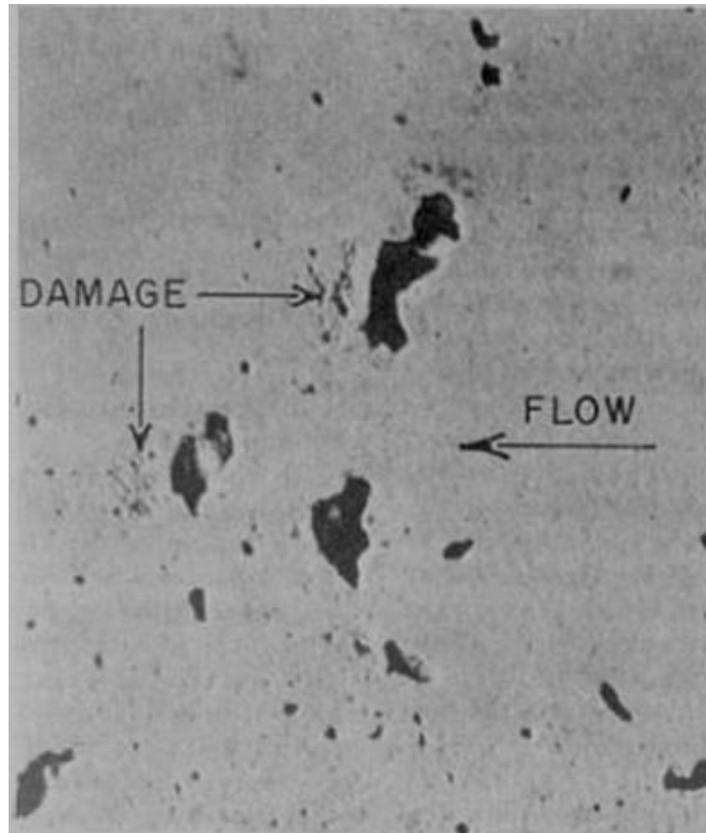
Pada saat lantai beton saluran luncur dibentuk namun proses konsolidasinya tidak sempurna, maka kantong udara akan terbentuk di permukaannya. Kantong udara itu menyebabkan lubang di permukaan lantai saluran luncur. Pada kecepatan aliran yang sangat tinggi, lubang-lubang ini menjadi sumber kerusakan yang diakibatkan oleh kavitasi, Ball menunjukkan hal ini seperti tersaji dalam Gambar 2.6. Pada tahun 1960, terdapat kecenderungan praktik di lapangan yaitu menutup lubang-lubang itu terutama yang memiliki ukuran garistengah di atas 12 mm serta yang alirannya mencapai 30 m/s.

Mefford dan Falvey (1984) melakukan pebelitian tentang karakteristik kavitasi akibat lubang di permukaan dasar saluran luncur. Penelitian ini menggunakan parameter-parameter yang diterapkan oleh Arndt et al (1979), Gambar 2.5. Berdasarkan hasil penelitian ini, ditemukan bahwa lubang berbentuk lingkaran sempurna di lapisan batas memiliki pengaruh yang kecil terhadap kavitasi dibandingkan lubang yang berbentuk busur lingkaran, hal ini seperti tersaji dalam Gambar 2.7. Temuan penelitian tambahan, bahwa lubang yang garis tengahnya empat kali dari kedalamannya besaran indeks kavitasi adalah 1/6 dari lubang yang memiliki garis tengah dua kali kedalamannya. Hal ini menginformasikan bahwa sebagai ganti dari upaya penutupan lubang adalah mengupayakan diameter lubang diperbesar menjadi empat kali dari kedalamannya.

Tabel 2.2 menunjukkan koefisien untuk karakteristik kavitasi yang diakibatkan oleh lubang-lubang seperti yang dideskripsikan oleh Persamaan 2.10.

Tabel 2.2 Karakteristik kavitasi pada lubang di lapis batas

Depth/diameter	a	b	C
0,25	0,488	0,788	0,000105
0,50	0,532	0,626	0,000687



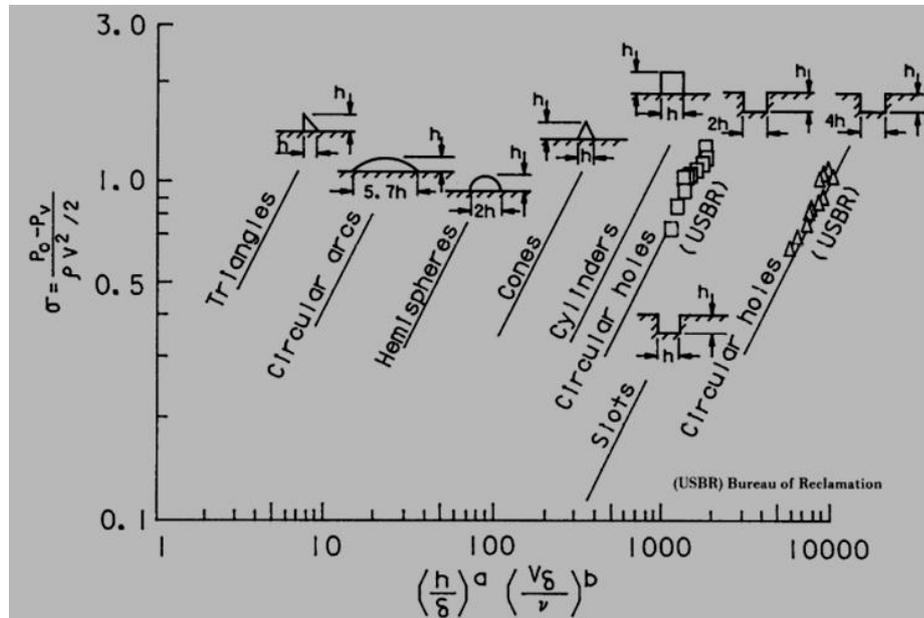
Gambar 2.6 *Kerusakan karena kavitasi berupa lubang berukuran kecil*

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

2.2.3 Alur Yang Melintang Di Saluran Curam

Alur melintang di lapisan batas saluran curam kadang-kadang merupakan bagian dari struktur yang penting. Alur yang melintang di saluran curam kadang-kadang memiliki ukuran yang kecil. Alur melintang yang ukurannya besar biasanya disebut sebagai slot aerator. Contoh yang sama dengan slot di saluran curam adalah seperti balok kayu yang melintang di saluran atau pintu air tipe sliding. Di samping itu, contoh dari alur adalah sambungan antar lantai dasar saluran luncur yang biasanya melintang. Karakteristik kavitasi dari dua contoh ekstrem di atas adalah berbeda, sehingga perlu dikaji melalui penelitian yang berbeda pula. Pada

alur, pengaruh lapisan batas sangat besar. Kaitannya dengan slot, lapisan batas mempunyai pengaruh yang kecil, namun pengaruh bentuk geometri justru besar.

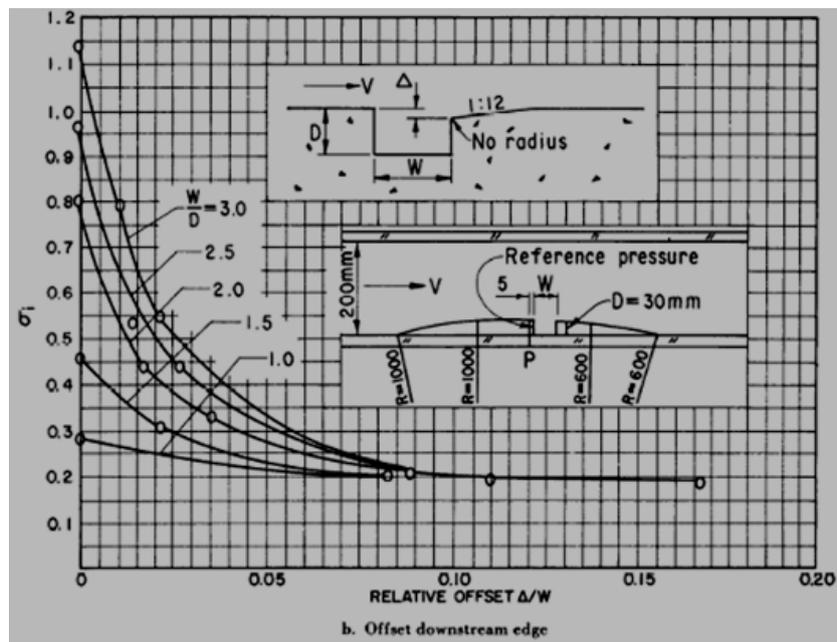
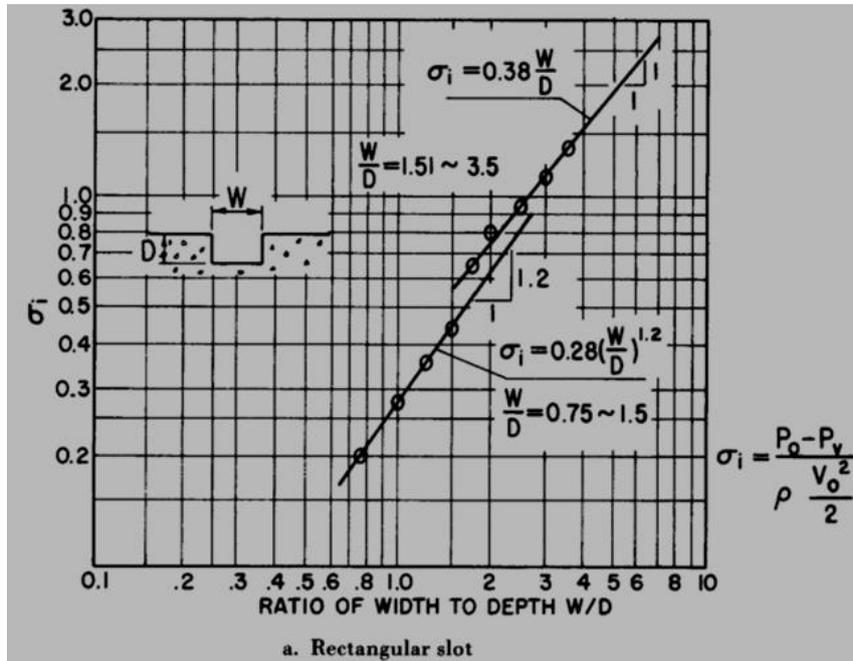


Gambar 2.7 Kerusakan karena kavitasi yang berupa lubang

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Karakter alur di saluran liuncur telah dipelajari oleh Ward (1973). Penelitian ini hanya berkaitan dengan alur bujur sangkar, sedangkan hasil-hasilnya seperti tersaji dalam Gambar 2.5. Ward (1973), melakukan penelitian pendahuluan yang tidak mempertimbangkan pengaruh lapisan batas, sehingga parameter itu tidak diakomodasi di dalam monograf.

Penelitian mengenai slot telah dilakukan oleh Jin et al (1980). Penelitian ini juga kurang mempertimbangkan ketebalan lapisan batas karena dianggap parameter yang sepele. Oleh karena itu, hasil-hasil penelitian ini tidak dapat saling diperbandingkan. Penelitian-penelitian ini tidak dibuat berdasarkan parameter yang kaku, panjang dan lebar saluran dibuat secara fleksibel, dengan demikian hasil-hasil penelitiannya harus dimaknai secara hati-hati.



Gambar 2.8 Karakteristik kavitasi pada slot pintu

Dirujuk dari "Cavitation in Chute and Spillways" yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

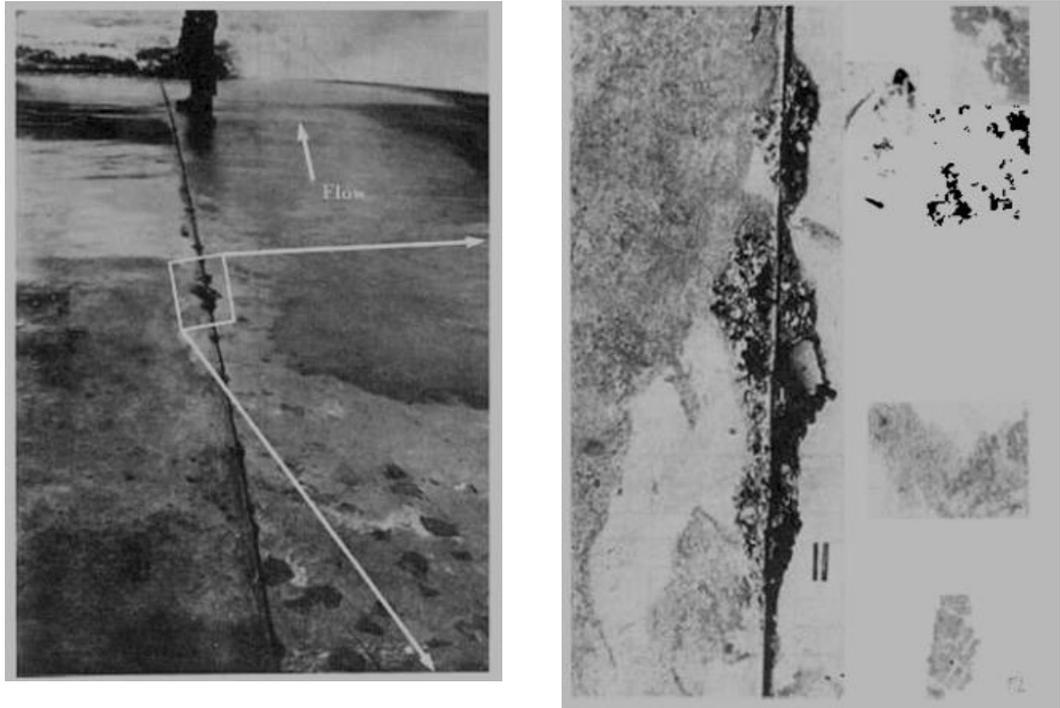
Rasio lebar slot terhadap lebar saluran menjadi efektif, dalam eksperimen yang dilakukan oleh Jin, variasi rasionya antara 0,056 dan 0,309. Ketidakteraturan dalam kurva indeks kavitasitas yang merupakan rasio perbandingan antara lebar dan kedalaman sebesar 1,5 sampai dengan 2,0 dimungkinkan karena pengaruh lapisan batas seperti tersaji di dalam Gambar 2.8a. Pengaruh yang bermanfaat dari kemiringan di hilir slot telah dipelajari seperti yang tersaji dalam Gambar 2.8b.

2.2.4 Alur Sejajar dengan Arah Aliran

Secara teoritik, alur atau ketidakteraturan arah vertikal dalam aliran permukaan yang sejajar dengan arah aliran akan menghasilkan pusaran yang menyebabkan kavitasitas. Meskipun demikian, potensi kavitasitas karena tipe ketidakteraturan adalah sangat kecil, di samping itu pengaruh alur sejajar aliran terhadap kavitasitas memang belum dipelajari secara laboratorik. Dalam hal ini, kerusakan pada alur yang sejajar arah aliran adalah jarang dilakukan.

Salah satu contoh kecil kerusakan kavitasitas dalam alur yang sejajar arah aliran telah dilakukan pengamatan khususnya di pekerjaan saluran luncur di bendungan *Palisades* seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.9. Salah satu eksperimen menunjukkan bahwa tekanan yang paling rendah di saluran luncur terjadi dihilir pintu dorong yaitu sebesar -0,85 m air. Tekanan di atas diukur di lokasi 13,7 m di hilir sisi keluar pintu air dan di garis tengah dari saluran luncur.

Lokasi kerusakan karena kavitasitas seperti tersaji dalam Gambar 2.9 tidak dapat diukur. Meskipun demikian, berdasarkan salah satu penelitian yang menggunakan sekumpulan *foto*, nampak bahwa kerusakan kavitasitas terjadi di lokasi yang mana tekanan sangat rendah. Tekanan yang sangat rendah berhubungan dengan kondisi indeks kavitasitas yang mendekati besaran 0,09 pada kondisi debit $156 \text{ m}^3/\text{s}$.



Gambar 2.9 Kerusakan kavitasi pada groove arah aliran

2.2.5 Kekasaran yang Seragam

Pada elemen kekasaran tunggal seperti dijelaskan sebelumnya, lapis geser ditempatkan di lokasi dalam wilayah yang spesifik di dalam aliran. Awal terjadinya kavitasi telah teramati di wilayah lapisan geser. Meskipun demikian, pada aliran yang memlalui kekasaran seragam seperti pada lapuisan pasir maka lapis geser akan melalui seluruh permukaan aliran. Karena itu, awal terjadinya kavitasi akan timbul secara acak di seluruh permukaan aliran. Jika indeks kavitasi diturunkan sampai dengan di bawah kondisi permulaan, kavitasi akan kelihatan di lapisan atas permukaan. Lokasi lembar ini dipengaruhi oleh spektrum dan besaran fluktuasi turbulen di dalam lapisan batas, seperti jumlah, ukuran, dan distribusi dari unsur yang sangat kecil di dalam lapisan batas.

Sedikit informasi yang perlu diketahui yaitu tentang spketrum tekanan di atas batas halus dan kasar di dalamlapis batas turbulen. Diasumsikan bahwa nilai akar

rerata kuadrat dari fluktuasi turbulen adalah parameter yang penting untuk digunakan guna taksiran potensi kavitasi di lapisan batas aliran, Arndt (1979) mengembangkan hubungan antar parameter dalam persamaan permulaan kavitasi, σ_i :

$$\sigma_i = 16C_f = 4f \quad (2.11)$$

Keterangan:

- C_f : Koefisien resisten rerata
- f : Faktor gesekan Darcy-Weisbach

2.2.6 Kombinasi antara kekasaran Seragam dengan Kekasaran Tunggal

Aliran di atas permukaan beton yang telah tererosi atau terkikis karena erosi yang saat ini dianggap sebagai tipe dari kekasaran permukaan. Kekasaran yang telah disebut di atas tidak termasuk ke dalam kekasaran terisolasi ataupun kekasaran seragam. Colgate (1956) telah mempelajari karakteristik kavitasi pada aliran melalui saluran yang terbuat dari batu kapur yang dapat dianggap sebagai aliran tererosi yaitu di bendungan Davis. Berdasarkan Persamaan 2.11 nilai koefisien itu berubah dari 16 menjadi $59,9 \pm 2,2$ dan $42,2 \pm 1,5$ secara berturut-turut.

Penelitian yang sama telah dilakukan pada permukaan saluran yang tererosi yaitu pelimpah jenis terowongan di bendungan Hoover Arizona. Dua kondisi telah dipelajari, satu di wilayah yang alirannya relatif halus yang kedua didekat ujung tekukan vertikal mercu pelimpah. Kondisi yang kedua telah dikonstruksi yaitu wilayah yang kasar yang lokasinya 300 m di hilir tekukan saluran luncur pelimpah tipe terowongan. Dalam hal ini, besarnya koefisien dalam Persamaan 2.11 berubah dari 16 menjadi $60,5 \pm 8,7$ sampai dengan $73,9 \pm 9,4$, sedangkan pada koefisien hambatan adalah $0,017 \pm 0,001$ sampai dengan $0,023 \pm 0,004$. Besaran

koefisien yang disebut paling belakang berhubungan dengan bagian beton yang lebih kasar.

Dua contoh yang telah disebutkandi atas menggambarkan kesulitan dalam menaksir karakteristik kavitasi pada permukaa saluran yang tidak masuk dalam kategori kekasaran isolasi maupun kekasaran yang tersebar secara seragam. Rerata koefisien kekasaran pada permukaan saluran yang tererosi adalah empat kali lebih besar dibandingkan dengan hasil eksperimen yang telah dilaporkan oleh Arndt et al (1979).

Permulaan kavitasi tergantung atas jangka waktu dan besaran dari fluktuasi tekanan negatifnya. Turunan dari Persamaan 2.11 digunakan untuk menghitung akar rerata kuadrat dari suatu nilai yang digunakan untuk menentukan karakteristik dari fluktuasi besaran tekanan. Meskipun demikian, fluktuasi tekanan tidak mengikuti distribusi Gaussian, bahkan jika fluktuasi turbulennya pun mengikuti distribusi Gaussian, (Arndt dan Daily, 1969) Karena itu, menggunakan nilai akar kuadrat rerata di dalam turunan persamaan dapat dipertanyakan. Sebagai tambahan, Arndt (1979) memberikan catatan bahwa bagian frekuensi yang tinggi dari spektrum tekanan itu disebabkan oleh aliran yang melalui batas kasar yang skalanya tidak sama dengan aliran yang melalui dinding halus. Penskalaan pusaran turbulen melalui saluran batas kasar dan halus dibutuhkan penelitian lanjutan.

BAB III

KERUSAKAN KARENA KAVITASI

3.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kerusakan karena Kavitasasi pada Permukaan Saluran Curam

Kerusakan struktur hidraulik saluran curam biasanya melibatkan beberapa mekanisme. Sebagai contoh, jika kavitasasi terbentuk karena ketidakrataan permukaan saluran, kerusakan permukaan akan dimulai dari hilir pecahnya gelembung yang mengandung tekanan uap. Setelah keadaan di atas, kadang-kadang lubang memanjang akan terbentuk di permukaan saluran yang terbuat dari beton. Selanjutnya, ukuran lubang bertambah besar, di sisi lain kecepatan aliran bertambah tinggi yang membentur ujung lubang yang menyebabkan lubang bertambah besar. Aliran tersebut menciptakan tekanan tinggi disertai dengan bunyi berisik di sekeliling lembaran agregat permukaan saluran, yang akhirnya mengerosi lubang tersebut. Perbedaan tekanan diantara zona terdampak dan wilayah yang mengelilingi lubang tercipta yang mana akan menyebabkan lembaran agregat beton menjadi pecah yang selanjutnya dihanyutkan oleh aliran ke arah hilir saluran. Proses kerusakan ini dapat disebut sebagai erosi, sedangkan kehilangan material karena kavitasasi tidak secara tegas dikatakan sebagai erosi. Dalam hal ini, erosi didefinisikan sebagai abrasi atau pemisahan atau merupakan proses transportasi.

Pada saat kecepatan aliran sangat tinggi melalui permukaan saluran curam, terdapat potensi kerusakan yang disebabkan oleh kavitasasi. Kerusakan permukaan saluran curam oleh kavitasasi dijelaskan melalui beberapa tahapan, yaitu: (1) penyebab kavitasasi; (2) lokasi kerusakan; (3) intensitas kavitasasi; (4) besaran kecepatan aliran; (5) konsentrasi udara di dalam air; (6) ketahanan permukaan saluran terhadap kerusakan; dan (7) kemampuan permukaan saluran terhadap dampak kavitasasi.

3.2 Penyebab Kavitas

Seperti yang telah dijelaskan pada bab-bab sebelumnya bahwa kavitas terjadi karena tekanan lokal pada air yang mengalir turun sampai dengan tekanan berada di bawah tekanan uapnya. Sebagai contoh, kasus ini terjadi pada saat terjadi pukulan air, yaitu ketika tekanan Pizometrik di dalam aliran pipa turun sampai dengan di bawah tekanan atmosfer atau tekanan menjadi negatif. Meskipun demikian, kasus kavitas sering terjadi yaitu di struktur hidraulika terutama pada saat terjadi ketidakaturan permukaan aliran akibat permukaan saluran curam yang melengkung. Uraian terperinci tentang kavitas karena ketidakaturan permukaan saluran curam telah dibahas di Bab 2 di atas.

Aliran geser juga dapat menciptakan kavitas. Submerged jet adalah salah satu contoh jenis aliran geser. Geseran dihasilkan oleh kecepatan jet yang sangat tinggi dengan air diam yang melingkupi aliran jet tersebut. Aliran geser juga terjadi di dalam aliran yang berada di sisi bawah permukaannya. Para peneliti hanya mengkaji karakteristik kavitas dari sisi aliran geser yang berada di sebelah atas lapisan batas.

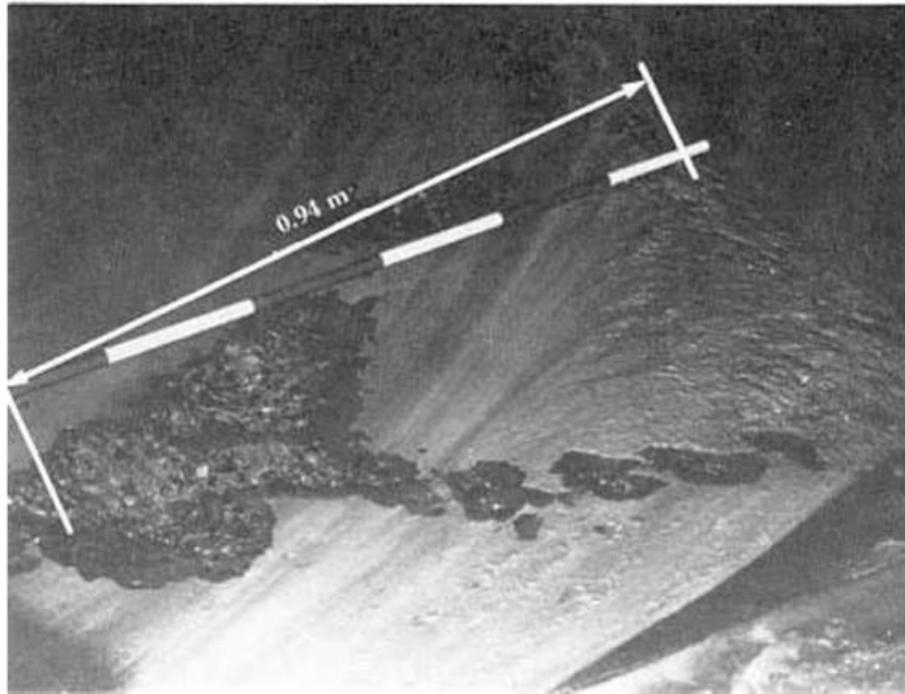
3.3 Lokasi Kerusakan

Kerusakan kavitas selalu terjadi di sisi hilir sumbernya. Stinebring (1980), mencontohkan fenomena kavitas pada suatu pipa silinder, di katakan bahwa kerusakan karena kavitas dimulai pada saat awan kavitas telah sama dengan diameter silinder. Stinebring (1980), menemukan persamaan ukuran panjang awan kavitas, L_k , sebagai berikut:

$$\frac{L_k}{H} = 2 \left(\frac{\sigma_s}{\sigma} \right)^{2,63} \quad (3.1)$$

Keterangan:

- H : Karakteristik dimensi, misal tinggi undakan atau diameter silinder
- L_k : Panjang awan kavitasi
- σ : Indeks kavitasi aliran
- σ_s : Indeks kavitasi pada saat kerusakan dimulai, parameter ini berkaitan dengan indeks kavitasi ketika $L_k/H=1$

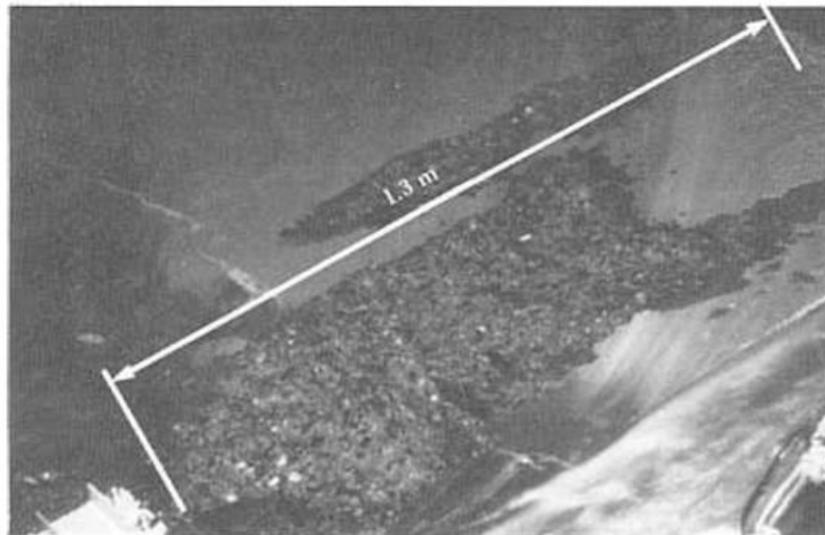


3.1a. Kerusakan kavitasi pada saat dilakukan survey menggunakan foto (Fall, 1981)

Stinebring juga menunjukkan bahwa kerusakan yang paling maksimal terjadi dekat ujung akhir dari awan kavitasi. Eksperimen yang dilakukan Stinebring menyetujui secara baik dengan hasil pengamatan kerusakan karena kavitasi di bangunan pelimpah bendungan Glen Canyon.

Setelah kira-kira selama 20 hari bendungan Glen Canyon beroperasi, pada saat debit mencapai $205 \text{ m}^3/\text{s}$, kerusakan dapat teramati di hilir saluran luncur terowongan sebelah kiri berupa retakan seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3.1a. Setelah 3 hari beroperasi, pada saat debit rerata mencapai $425 \text{ m}^3/\text{s}$,

kerusakan yang kedua teramati di hilir kerusakan yang pertama, seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.1b.



3.1b. Kerusakan karena kavitasi hasil pengamatan pada 6 Juni 1983

Gambar 3.1 Kerusakan bendungan Glen Canyon, pelimpah Tunnel sebelah kiri di stasiun 760,7 m

Tabel 3.1 Panjang lubang karena kavitasi di bendungan Glen Canyon, pelimpah Tunnel sebelah kiri di stasiun 760,7 m

Dis-charge m ³ /s	Estimated height of deposit, mm	Cavitation index of deposit*	Distance to maximum damage, m [†]
205	7	0.713	0.99
425	7	0.728	1.22

* The cavitation index of the deposit is determined using the equation for a circular arc given in chapter 2 (see fig. 2-5) where ($T_c = 5^\circ\text{C}$):

$Q = 205 \text{ m}^3/\text{s}$	$V_u = 40.82 \text{ m/s}$	$\delta = 1.62 \text{ m}$
$Q = 425 \text{ m}^3/\text{s}$	$V_u = 45.37 \text{ m/s}$	$\delta = 1.64 \text{ m}$

† Cavitation indexes of the flow, at this station, are:
 $\sigma = 0.141$ at $Q = 205 \text{ m}^3/\text{s}$, and
 $\sigma = 0.133$ at $Q = 425 \text{ m}^3/\text{s}$.

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Persamaan 3.1 dapat digunakan untuk meramalkan jarak dari wilayah kerusakan maksimal. Nilai-nilai itu selaras dengan Tabel 3.1. Catatan, lokasi kerusakan dapat diperkirakan secara cukup baik; persamaan pendekatan harus dibuat agar ketinggian deposit kalsit dapat diperkirakan dari karakteristik kavitasi. Hasil analisis ini menunjukkan bahwa jarak maksimal kerusakan kavitasi meningkat sebagai fungsi dari penambahan debit dan peningkatan ketinggian ketidakrataan permukaan. Survei fotografik menandai luas kerusakan, oleh karena itu, panjang dari wilayah kerusakan juga meningkat bersamaan dengan peningkatas ketinggian dari ketidakrataan.

Tabel 3.2 Panjang lubang karena kavitasi di bendungan Glen Canyon, pelimpah Tunnel sebelah kiri di stasiun 739,38 m

Dis-charge m ³ /s	Estimated height of deposit, mm	Cavitation index of deposit*	Distance to maximum damage, m [†]
205	5	0.635	0.55
425	5	0.652	0.67

* The cavitation index of the deposit is determined using the equation for a circular arc given in chapter 2 (see fig. 2-5) where ($T_c = 5^\circ\text{C}$):
 $Q = 205 \text{ m}^3/\text{s}$ $V_u = 40.86 \text{ m/s}$ $\delta = 1.06 \text{ m}$
 $Q = 425 \text{ m}^3/\text{s}$ $V_u = 45.15 \text{ m/s}$ $\delta = 1.06 \text{ m}$

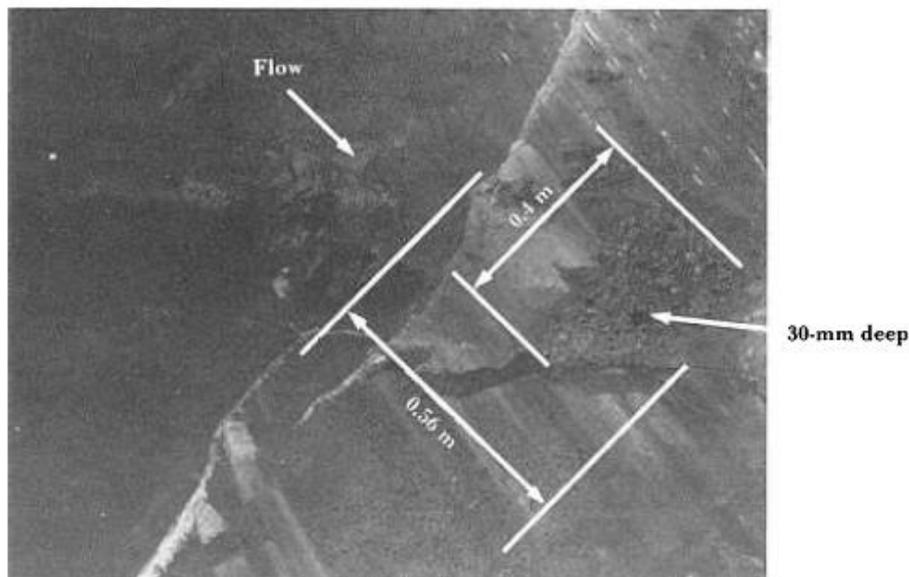
† Cavitation indexes of the flow, at this station, are:
 $\sigma = 0.138$ at $Q = 205 \text{ m}^3/\text{s}$, and
 $\sigma = 0.132$ at $Q = 425 \text{ m}^3/\text{s}$.

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Lebih jauh ditemukan bahwa kerusakan di bangunan pelimpah telah diobservasi, tetapi dua wilayah terpisah kerusakan tidak berkembang sebagaimana ditunjukkan di dalam Gambar 3.2a dan 3.2b. Persamaan Stinebring dapat meramalkan

perbedaan diantara dua wilayah seperti ditunjukkan dalam Tabel 3.2. Meskipun demikian, perbedaan relatif sangat kecil terhadap ukuran wilayah kerusakan yang mana dua wilayah kerusakan tidak dapat dibedakan.

Dua pengamatan ini membawa ke dalam pertanyaan mengenai suatu asumsi yang secara luas diadakan tentang pembentukan kerusakan karena kavitasi. Asumsi ini adalah tentang kecenderungan kavitasi yang membentuk seperti pohon natal serta membentuk pola rusak sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 3.2. Pada saat kerusakan awal telah terbentuk, diasumsikan bahwa wilayah kerusakan menjadi sumber kavitasi yang selanjutnya menciptakan kerusakan lainnya di aras hilir. Karena wilayah yang dirusakkan adalah lebih besar dibanding ketidakteraturan yang menyebabkannya, maka proses itu berlanjut yaitu menghasilkan wilayah kerusakan yang lebih besar.



3.2 a. Kerusakan kavitasi pada saat dilakukan survey menggunakan foto (Henry T. Falvey, 1990)

Pola kerusakan berupa pohon natal berkembang hanya setelah kedalaman kerusakan karena kavitasi menjadi relatif besar terhadap kedalaman aliran. Pada lubang besar, mekanisme kerusakan yang diakibatkan oleh erosi menjadi lebih niscaya yang mana hal ini disebabkan oleh kecepatan jet aliran pada permukaan

yang kasar dibandingkan oleh kavitasi. Erosi permukaan oleh karena kecepatan jet aliran yang tinggi di luar keberadaan kavitasi belum dipelajari secara sistematis.

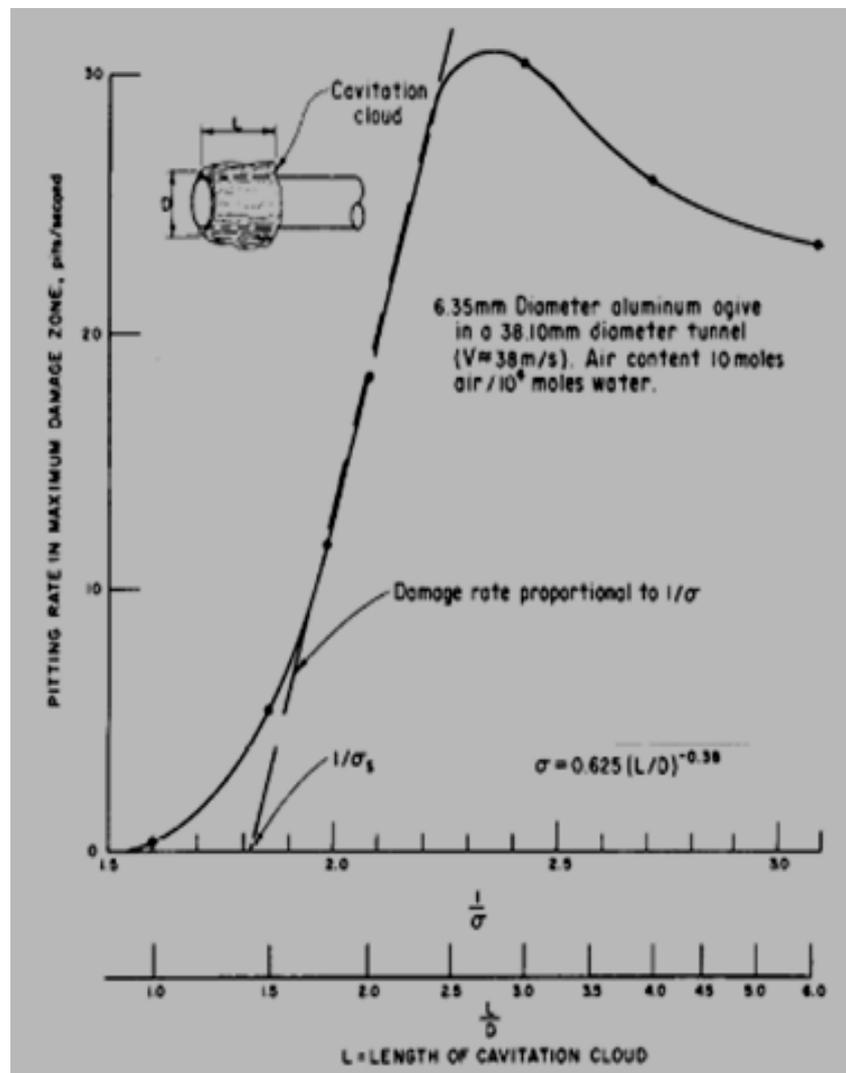


3.2 b. Kerusakan karena kavitasi hasil pengamatan pada 6 Juni 1983

Gambar 3.2 *Kerusakan bendungan Glen Canyon, pelimpah Tunnel sebelah kiri di stasiun 739,38 m*

3.4 Intensitas Kavitasi

Intensitas kavitasi adalah parameter yang sangat sulit untuk diukur. Stinebring (1980) berdasarkan pengamatan menemukan bahwa indeks kavitasi, σ , relatif berkurang terhadap nindkes kavitasi permulaan, σ_i , laju kerusakan meningkat secara perlahan seperti tercatat dalam Gambar 3.3. Indeks kavitasi adalah turun, jika laju kerusakan (diwujudkan sebagai lubang per cm^2/s) adalah berbanding terbalik secara proporsional dengan indeks kavitasi. Lebih lanjut dikatakan bahwa jika indeks kavitasi dikurangi akan menimbulkan suatu titik yang mana tingkat kerusakan memncapai nilai maksimal. Berdasarkan hal ini, nampaknya bahwa intensitas kavitasi meningkat dan selanjutnya berkurang pada saat indeks kavitasi berada di bawah nilai indeks kavitasi permulaan.

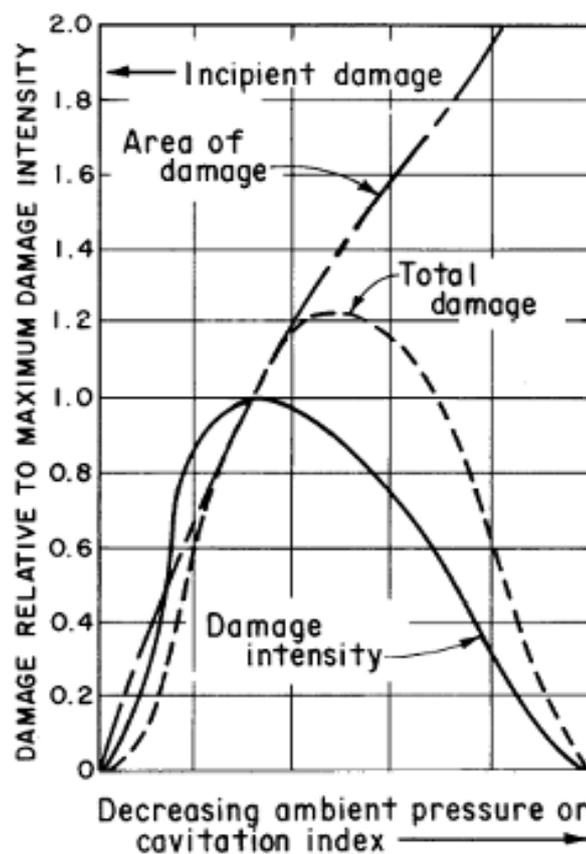


Gambar 3.3 Laju kerusakan karena kavitasi (Stinebring, 1980)

Colgate (1977) mengemukakan bentuk kurva yang sama untuk intensitas kerusakan pada saat indeks kavitasi menurun (tekanan lokal menurun). Colgate menandai bahwa puncak dari kurva kerusakan total tidak bersamaan dengan puncak intensitas kurva kerusakan. Sebagai informasi tambahan, ia menunjukkan bahwa wilayah kerusakan berlanjut serta tumbuh menjadi lebih besar pada saat indeks kavitasi menurun seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.4.

Hasil pengamatan Colgate (1977) dapat dijelaskan melalui penalaran sebagai berikut. Ketika tingkat kerusakan meningkat untuk nilai indeks kavitasi menurun

maka panjang awan kavitasi justru meningkat. Meskipun demikian, panjang awan kavitasi sangat sensitif terhadap variasi kecepatan aliran. Oleh karenanya, panjang wilayah kerusakan cenderung menjadi lebih besar pada saat perbedaan diantara indeks kavitasi permulaan dan indeks kevitasi dari aliran itu meningkat. Jadi, intensitas itu, diukur dalam lubang per cm^2/s , barangkali berkurang sedangkan jumlah keseluruhan material yang dipindahkan meningkat.



Gambar 3.4 Hubungan antara kerusakan karena kavitasi dengan indeks kavitasi

Kerusakan yang teramati di struktur hidraulik terjadi di sisi hilir dari ketidakaturan yang memiliki jarak di atas 100 kali dari tinggi ketidakaturan. Solusi berdasarkan Persamaan 3.1, untuk rasio jarak dan tinggi, menandakan bahwa indeks kavitasi aliran harus mendekati $1/6$ dari indeks kavitasi permulaan. Karena itu, berdasarkan Gambar 3.3, kerusakan yang terjadi di struktur hidraulik

berada di dalam kisaran laju kerusakan yang menurun. Percobaan laboratorium jarang yang dibuat di kisaran ini karena kesulitan dalam menciptakan fasilitas yang akan menghasilkan kerusakan pada nilai rendah dari indeks kavitasi. Sebagai konsekuensi, hanya data yang ajeg harus datang dari observasi lapangan. Sayangnya, ada satu kekurangan yaitu data yang baik.

3.5 Pengaruh Kecepatan Aliran

Salah satu asumsi adalah bahwa potensi kerusakan terjadi ketika kecepatan aliran melebihi dari nilai kecepatan aliran kritik. Terdapat beberapa pertimbangan untuk asumsi ini. Sebagai contoh, satu nilai yang tipikal dari indeks kavitasi permulaan bagi perubahan kasar geometri adalah sama dengan nilai indeks 2,0. Jika nilai ini diganti ke dalam Persamaan 1.5, bersamaan dengan asumsi bahwa tekanan acuan adalah sama dengan tekanan barometrik, kecepatan yang dihasilkan adalah 10 m/s. Karena itu, adalah bijaksana untuk meneliti kemungkinan kavitasi pada kecepatan aliran di atas 10 m/s.

Jika permukaan saluran curam terpapar kavitasi, pada saat kecepatan aliran konstan, jika hanya sebentar material permukaan dasarnya tidak akan hilang atau tererosi. Periode ini dikenal sebagai tahap inkubasi. Tahap selanjutnya adalah tahap akumulasi yang mana laju kehilangan permukaan dasar saluran meningkat secara dramatis sebagai fungsi waktu. Selanjutnya akan diikuti tahap keadaan tunak (*steady*) yang mana pada tahap ini laju kehilangan permukaan dasar konstan. Pada tahap keadaan tunak akan didahului oleh fase *attenuation* yang mana laju kehilangan permukaan dasar saluran terjadi penurunan.

Penelitian yang dilakukan di atas plat aluminium ditunjukkan bahwa di permukaannya akan terjadi lubang-lubang kecil cenderung seperti bintik-bintik yang mana hal ini merupakan pertanda dari fase inkubasi. Tenaga rerata per lubang kecil meningkat menjadi lima kali kemampuan awalnya, selanjutnya jumlah lubang meningkat menjadi enam kali dari kecepatannya. Karena itu,

tenaga keseluruhan dari proses pecahnya gelembung meningkat sampai dengan sebelas kali kecepatan aliran.

Setelah material permukaan mulai hilang, ketergantungan terhadap tingkat kehilangan menjadi membingungkan jika dikaitkan dengan kecepatan aliran. Beberapa peneliti mengaku bahwa laju kehilangan permukaan bervariasi terhadap lima kali kekuatan kecepatan, sedangkan yang lainnya telah menemukan bahwa hal itu bervariasi enam kali kekuatan kecepatan. Suatu keniscayaan bahwa variasi itu merupakan salah satu fungsi dari material dasar permukaan, metode dari pelaksanaan eksperimen, serta fase kerusakannya.

3.6 Pengaruh Konsentrasi Udara

Pada saat konsentrasi udara kecil, bahwa kerusakan berbanding terbalik dengan konsentrasi udara. Eksperimen yang dilakukan pada konsentrasi udara antara 8×10^6 sampai dengan 20×10^6 mole udara per mole air. Pada saat konsentrasi udara tinggi, 0,07 mole udara untuk setiap 1 mole air, kerusakan permukaan dapat dieliminasi, yang mana penelitian ini dilakukan selama 2 jam menggunakan fasilitas venturi, Peterka (1953).

Pada tahun 1945, asumsi bahwa udara yang masuk sampai ke bagian bawah aliran karena kecepatan aliran yang sangat tinggi akan bertindak sebagai bantal demikian seperti yang dikatakan Bradley (1945). Alasan lebih lanjut yang dikemukakan bahwa udara itu akan membantu membebaskan aliran dari tekanan-tekanan subatmosfir. Pada saat itu, aksioma yang dikemukakan oleh Bradley dianggap benar.

Pada saat sekarang, kedua teori yang tersebut di atas mampu menjelaskan pengaruh aerasi terhadap kerusakan karena kavitasi. Satu teori didasarkan pada anggapan bahwa keberadaan gas yang bersifat non kondensasi di dalam kantong uap air dapat diperlambat proses ledakannya karena keberadaan bantal gelembung

udara. Teori kedua didasarkan pada anggapan bahwa pecahnya gelembung uap air disebabkan karena perubahan kecepatan sonik zat cair.

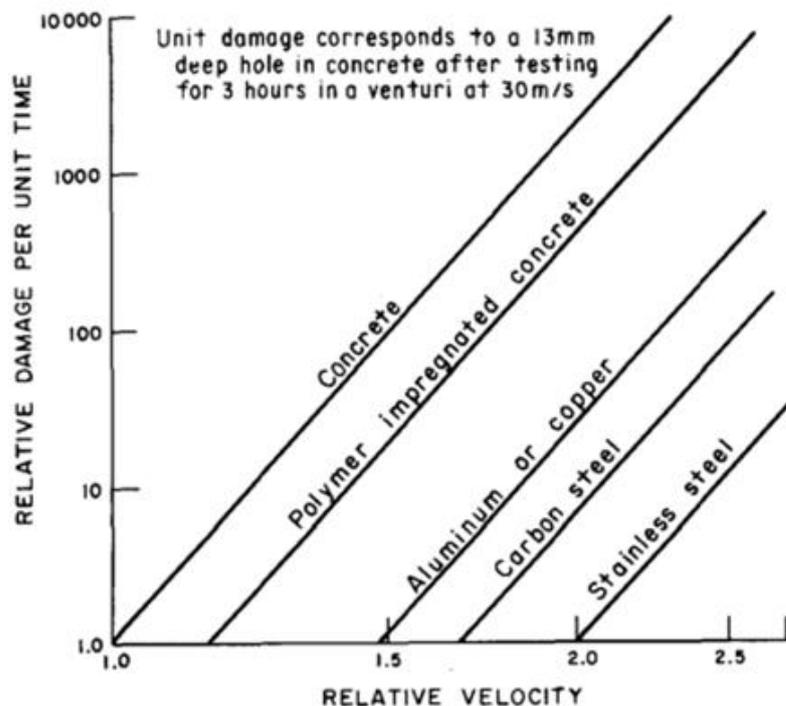
Berdasarkan pada dua teori di atas, nampaknya teori yang menyatakan bahwa kecepatan sonik zat cair dapat menyebabkan pecahnya gelembung uap air yang mengakibatkan proses pukulan terhadap dinding dasar maupun samping saluran adalah yang lebih valid. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa difusi dari gas menjadi kavitas uap air berjalan relatif sangat lambat dibandingkan dengan laju penguapannya.

3.7 Resistensi Permukaan Saluran terhadap Kerusakan Kavitas

Resistensi permukaan saluran terhadap kerusakan tergantung pada beberapa faktor, yaitu kekuatan, duktilitas, dan homogenitas dari materialnya. Tiga faktor di atas belum jelas benar pengaruhnya terhadap resistensi terhadap kerusakan kavitas, namun demikian kekuatan yang merupakan salah satu karakter dari material adalah yang paling utama ketika mengevaluasi resistensinya. Pada logam, deformasi permukaan saluran disebabkan oleh kasus pecahnya gelembung uap air yang menghasilkan gaya tarik yang sangat besar terhadap dasarnya. Pada permukaan beton, gaya tarik yang sangat besar juga merupakan faktor yang menentukan kejadian kerusakan kavitas. Jadi, kekuatan tarik namun bukan tekanan serta kekuatan geser yang barangkali merupakan parameter paling penting. Properti dari duktilitas dan kekuatan dapat dikombinasikan ke dalam satu parameter yang lazim disebut sebagai gaya pegas (Rao,1981).

Saat ini, hubungan antar parameter di atas belum dikembangkan untuk mengetahui besarnya kerusakan karena kavitas. Meskipun demikian, sangat mungkin terjadi bahwa resistensi suatu material terhadap material yang lain dapat mengakibatkan kavitas. Sebagai contoh, kavitas menghasilkan lubang dengan kedalaman 13 mm setelah permukaan saluran beton dilalui aliran dengan kecepatan 30 m/s. Lubang dengan ukuran yang sama pada saat aliran dengan

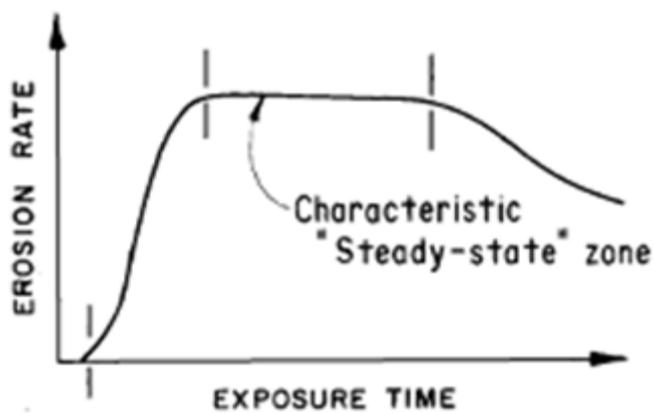
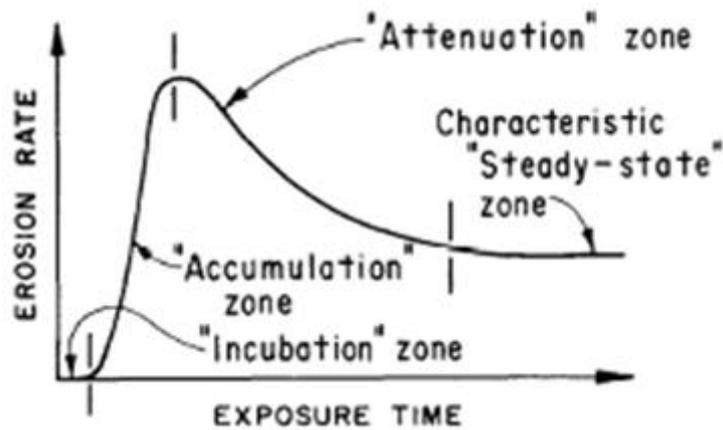
kecepatan 30 m/s dilakukan selama 125 jam di atas saluran yang terbuat dari polimer, sedangkan pada dasar saluran yang terbuat dari baja dicapai setelah 6000 jam. Baja karbon rusak 7 kali lebih cepat dibandingkan dengan baja tahankarat; di samping itu tembaga atau alumunium 25 kali lebih cepat rusak dibandingkan dengan baja tahan karat.



Gambar 3.5 Perbandingan resistansi kavitasi pada berbagai material (Colgate, 3).

3.8 Pengaruh Lama Paparan Kavitasi terhadap Kerusakan

Laju erosi pada beberapa permukaan dasar saluran yang diakibatkan oleh kavitasi tidak konstan terhadap waktu. Berdasarkan hasil pengamatan ditunjukkan bahwa terjadi beberapa perbedaan dalam waktu ketahanan terhadap paparan kavitasi. Heymann telah menemukan beberapa karakteristik material dalam hal lama ketahanan terhadap kavitasi, secara lebih jelas disajikan dalam Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Laju kerusakan karena kavitasi Heyman [7]

Pada awalnya, eorsi atau periode hilangnya material permukaan dasar dan samping dinding saluran belum terjadi. Periode ini disebut sebagai "zona inkubasi". Pada zona ini, permukaan dasar saluran yang terbuat dari logam menjadi berbintik-bintik. Banyak peneliti menggunakan data yang diambil dari zona inkubasi sebagai parameter yang paling penting untuk menghubungkan dengan kerusakan karena kavitasi.

Setelah zona inkubasi, laju kerusakan karena kavitasi meningkat secara cepat, yang mana periode ini disebut sebagai 'zona akumulasi'.Zona ini selanjutnya

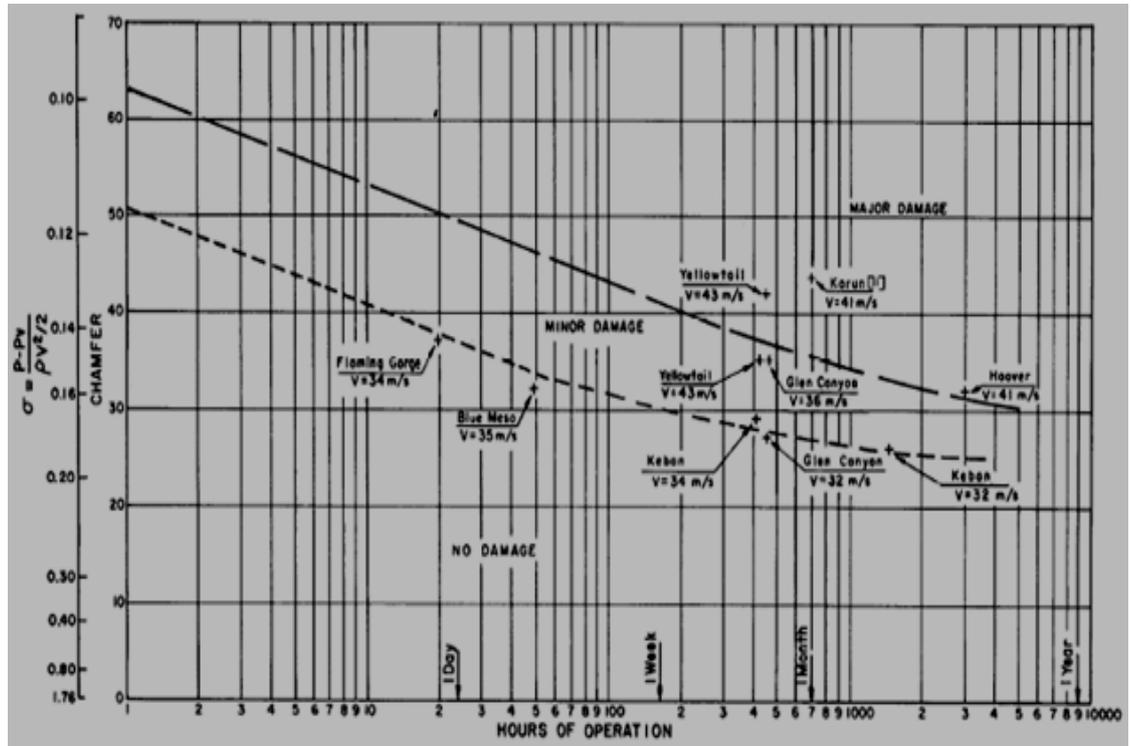
menjangkau puncak kurva. Laju kerusakan mengikuti salah satu dari kurva yang ditunjukkan dalam Gambar 3.6, yang mana hal ini tergantung pada instrumen yang digunakan untuk menguji laju kerusakannya. Laju kerusakan karena kavitasi meningkat pada saat masuk ke "zona peningkatan" yang diikuti oleh laju kerusakan yang berupa dataran konstan di puncak kurva yang lazim disebut sebagai "zona keadaan tunak", yang selanjutnya akan diikuti penurunan kurva yaitu ke "zona penurunan", seperti disajikan dalam Gambar 3.6.

Pada struktur hidraulik, yang mempunyai bats yang tidak teratur, yaitu lokasi yang mana terjadi proses pecahnya gelembung uap air menjadi bagian yang lebih kecil dan banyak tidak berubah secara signifikan selama proses kerusakan terjadi. Ini mempunyai makna bahwa telah terjadi peningkatan kerusakan, jarak antara pecahnya gelembung uap air dan permukaan dasar saluran juga meningkat. Jadi, hal itu dapat diharapkan bahwa laju kerusakan akan cenderung berbanding terbalik dengan waktu. Seiring dengan peningkatan waktu, pada saat laju aliran yang konstan, kedalaman kerusakan di hilir dari ketidakaturan bentuk dasar saluran akan menjangkau nilai yang ajeg. Hipotesis ini telah diverifikasi melalui penelitian yang dilakukan oleh Wang dan Cou [8].

3.9 Parameter yang Digunakan untuk Memprakirakan Kerusakan

Beberapa upaya telah dibuat untuk mengembangkan parameter yang diprakirakan secara kuantitatif berpengaruh terhadap kerusakan karena kavitasi. Pada umumnya, upaya-upaya telah mengenalkan tentang indeks kavitasi, kecepatan aliran, material yang digunakan sebagai konstruksi permukaan saluran, serta lama paparan adalah parameter-parameter yang sangat penting. Misalnya, salah satu upaya adalah menghubungkan antara indeks kavitasi minimal dengan waktu dan luas kerusakan seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3.7, kurva ini disusun oleh Falvey (1982). Meskipun prakiraan-prakiraan itu telah diperbaiki dengan

cara meningkatkan jumlah data, namun metode ini tetap tidak mempertimbangkan efek kecepatan aliran guna memprakirakan kerusakan karena kavitas.



Gambar 3.7 Pengalaman kerusakan karena kavitas

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Metode yang lain untuk memprakirakan perluasan kerusakan karena kavitas dikemukakan oleh Wang dan Chou (1979). Metode yang dikemukakan oleh Wang dan Chou (1979) menggunakan asumsi bahwa kerusakan karena kavitas akan terjadi di dasar saluran setelah beroperasi dalam waktu yang lama. Waktu stabilitas operasi diperkirakan selama 200 jam. Prakiraan kedalaman kerusakan akan stabil D_s (mm) dapat digunakan persamaan di bawah ini:

$$D_s = \left(\frac{v_h}{C_e} \right)^a \quad (3.2)$$

Keterangan:

$$a : 7,7I_c^{0,44}$$

$$C_e : \text{Faktor kedalaman stabilitas kerusakan} = 9,61I_c^{-0,32}$$

v_h : Kecepatan aliran di atas undakan

σ_{fh} : Indeks kavitasi aliran berdasarkan pada kondisi di atas undakan lihat Persamaan 1.9

$$I_c : \text{Intensitas kerusakan karena kavitasi } (\sigma_r - \sigma_{fh}) / \sigma_r$$

Pengukuran prototipe bangunan pelimpah bendungan Feng man yang dilaporkan oleh Wang dan Chou, fluktuasi tekanan di dalam aliran sama dengan 10,7 % dari kecepatan aliran rerata. Oleh karena itu, koefisien intensitas tekanan, δ_0 , sama dengan 0,05. Kekuatan beton pelimpah bendungan Feng Man adalah 20 sampai dengan 25 megapascal. Total ketinggian tekanan adalah 72 m sedangkan debit aliran sebesar 760 m³/s.

Metode ini menggunakan asumsi bahwa keluasan kerusakan konfigurasinya akan stabil jika terdapat waktu yang cukup yang diijinkan untuk berproses. Meskipun demikian, metode ini tidak memberi solusi perkiraan tentang bagaimana hubungan antara perkembangan kerusakan dengan waktu. Oleh karena itu, metode pengembangan yang saat ini digunakan untuk memprakirakan potensi kerusakan dan untuk pengukuran secara kuantitatif waktu perkembangan kerusakan didasarkan pada bukti empirik.

Saat ini, metode kuantitatif tidak digunakan untuk memprakirakan resistensi permukaan terhadap kerusakan. Berdasarkan sifat fisik dari permukaan, metode prakiraan kerusakan telah dikembangkan menjadi dua tahap. Tahap pertama adalah mengembangkan satu parameter yang merupakan indikasi keagresifan dari aliran kavitasi, yaitu dalam hal potensi kemampuan kavitasi dalam merusak permukaan saluran. Tahap kedua adalah mengembangkan indikasi yang berupa indeks yang gunanya untuk menggambarkan intensitas kerusakan yang sangat tinggi selaras dengan meningkatnya waktu.

3.10 Potensi Kerusakan

Di sub judul "lokasi kerusakan", kerusakan total telah ditunjukkan yaitu berkaitan dengan perbedaan antara indeks kavitasi dari permukaan saluran yang tidak beraturan ketika terjadi kerusakan awal, σ_r , dan indeks kavitasi aliran, σ . Hal ini juga ditunjukkan dalam Gambar 3.3 bahwa pada sebagian kurva laju kerusakan adalah berbanding terbalik dengan indeks kavitasi permulaan. Berdasarkan pada dua hasil penelitian, potensi kerusakan, D_p , dapat dihitung menggunakan persamaan non dimensi seperti di bawah ini:

$$D_p \propto \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_f} \right)^a \quad (3.3)$$

Keterangan:

- σ_s : Indeks kavitasi pada saat awal kerusakan
- σ_f : Indeks kavitasi aliran

Meskipun demikian, keagresifan dari kavitasi juga merupakan fungsi dari peningkatan kecepatan aliran relatif terhadap kekuatannya. Kecepatan aliran rujukan diperoleh dengan cara menyelesaikan persamaan 1.5 untuk kecepatan aliran yang menggunakan tekanan pizometrik di lokasi yang dipermasalahkan serta berhubungan dengan indeks kavitasi pada saat awal terjadinya kerusakan karena kavitasi. Secara matematik, kecepatan aliran rujukan untuk potensi kerusakan dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$v_r = \left[\frac{2(P_b - P_v)}{\rho \sigma_s} \right]^{1/2} \quad (3.4)$$

Keterangan:

- P_b : Tekanan di wilayah datar yang tidak teratur

- P_v : Tekanan uap
 v_r : Kecepatan aliran rujukan

Menggunakan asumsi pangkat 6, hubungan antara kecepatan aliran dengan potensi kerusakan dapat dihitung menggunakan persamaan di bawah ini:

$$D_p \propto \left(\frac{v}{v_r} \right)^6 \quad (3.5)$$

Keterangan:

- v : Kecepatan aliran

Kombinasi Persamaan 3.3 dan 3.5 adalah sebagai berikut:

$$D_p \propto \left(\frac{1}{\sigma_s} \right) \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_f} - 1 \right) \left(\frac{v}{v_r} \right)^6 \quad (3.6)$$

3.11 Indeks Kerusakan

Tingkat kerusakan di struktur hidraulika, diasumsikan berbanding terbalik terhadap variasi waktu. Wujud dari uraian ini seperti tersaji di bawah ini:

$$\frac{dE_d}{dt} \propto \frac{1}{t} \quad (3.7)$$

Keterangan:

- E_d : Kedalaman pada saat kerusakan karena kavitasi
 t : Waktu

Integrasi Persamaan 3.7 menunjukkan bahwa kedalaman kerusakan karena kavitasi harus sebanding dengan waktu logaritma, seperti di bawah ini:

$$E_d \propto \ln(t - t_0) \quad (3.8)$$

Keterangan:

t_0 : Konstanta integrasi

Intensitas kerusakan yang sangat tinggi adalah sebanding dengan keagresifan kavitasi terhadap waktu logaritma, serta indeks kerusakan, D_i , dapat dihitung menggunakan persamaan di bawah ini:

$$D_i = D_p \ln(t - t_0) \quad (3.9)$$

Konstanta integrasi, t_0 , diperkenalkan ke dalam persamaan untuk menetapkan efek kumulasi aliran dalam variasi debit. Nilai konstanta integrasi diperoleh dari:

$$t_0 = t_c - e^{(D_i/D_p)} \quad (3.10)$$

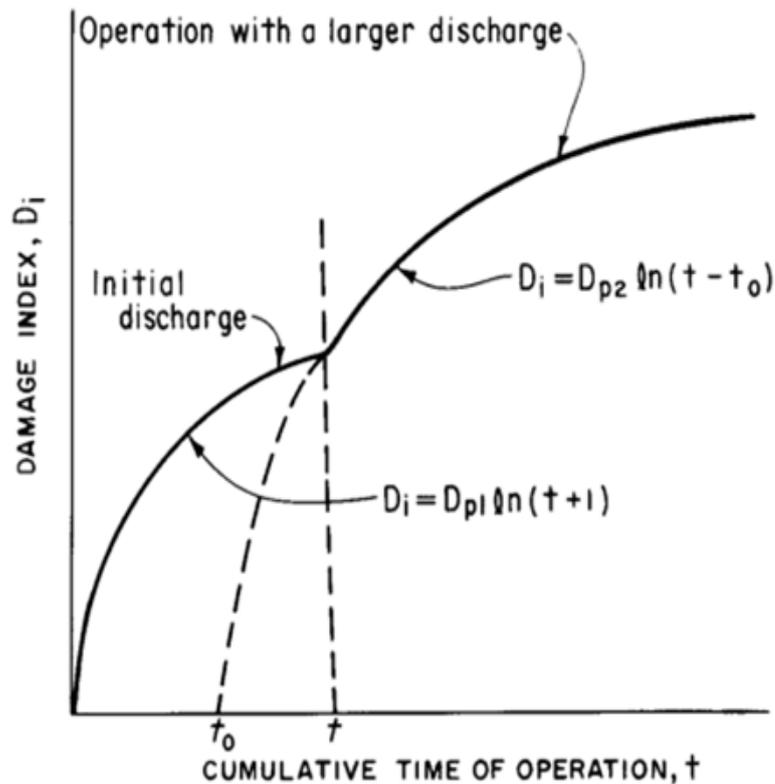
Keterangan:

t_c : Total waktu operasi
 D_i : Indeks kerusakan di akhir debit sebelumnya
 D_p : Kerusakan potensial, untuk debit selanjutnya

Pada saat awal operasi kondisi parameter dari struktur hidraulika adalah $D_i=0$; $t_0=0$; dan $t_c=0$.

Indeks kerusakan adalah suatu ukuran kuantitatif semu terhadap ganasnya kerusakan yang disebabkan oleh kavitasi sebagai fungsi dari debit dan waktu seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.8. Hal itu dapat digunakan untuk membedakan kerusakan minor (yang tidak memerlukan perbaikan) dan kerusakan mayor (yang memerlukan perbaikan). Indeks lazimnya tidak nampak seperti suatu prakiraan yang baik terhadap kerusakan yang menyebabkan malapetaka dengan suatu perkecualian; kerusakan yang menyebabkan malapetaka belum pernah

terjadi jika indeks hanya meprakirakan bahwa kerusakan itu adalah minor. Cara atau metode untuk mengevaluasi kerusakan yang ganas (indeks kerusakan) dibahas di dalam nilai desain yang berikut ini.



Gambar 3.8 Variasi indeks kerusakan dengan debit dan waktu

Dirujuk dari "Cavitation in Chute and Spillways" yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

3.12 Nilai Rancangan

Kesukaran dijumpai dalam memperoleh data yang mana indeks kerusakan telah dikalibrasi. Tidak hanya kesulitan dalam memperoleh catatan operasi struktur, tetapi juga ketinggian sebagaimana konstruksi itu dibangun namun juga mengenai ketidakteraturan dasar saluran dan kedalaman dari kerusakan yang tidak secara rutin dipetakan di lapangan.

Kalibrasi terhadap indeks kerusakan adalah hal yang sulit juga, karena beberapa kerusakan boleh jadi disebabkan oleh faktor lain dibandingkan dengan ketidakteraturan permukaan aliran. Sebagai contoh, bukti keberadaan bahwa terdapat indikasi kerusakan yang menyebabkan malapetaka barangkali disebabkan oleh pusaran arah longitudinal struktur dalam aliran. Pusaran arah longitudinal dapat mempunyai intensitas kavitasi yang jauh lebih tinggi dibanding yang disebabkan oleh ketidakteraturan batas.

Tabel 3.3 Indeks kerusakan pada Bendungan Glen Canyon, terowongan sebelah kiri

Date	Figure	Station m	Height of offset, mm	Damage index
Fall 1981	3.1a	760.7	7	4 040
Fall 1981	3.2a	739.4	5	3 000
Fall 1981	3.10a	729.3	30	4 420*
Jun 6, 1983	3.1b	760.7	7	5 360
Jun 6, 1983	3.2b	739.4	5	3 870
Post 1983 flood	3.10b	729.3	30	29 600

* Assumed popout occurred July 6, 1980.

Dirujuk dari "Cavitation in Chute and Spillways" yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Biro bendungan Glen Canyon mempunyai beberapa data terbaik untuk mengevaluasi indeks kerusakan. Konstruksi pelimpah dioperasikan melalui periode operasi yang diperluas yaitu dari tahun 1980 sampai dengan 1982. Pada tahun 1981, suatu kegiatan pengawasan mengungkapkan bahwa terdapat banyak wilayah yang mengalami kerusakan karena kavitasi. Setelah pengawasan dilakukan, survey fotografi dibuat dan diperoleh wilayah lokasi kerusakan. Setelah kerusakan yang signifikan terjadi pada tahun 1983, beberapa foto dibuat di lokasi yang sama yang mana sesungguhnya telah teridentifikasi oleh foto di

tahun 1981. Akhirnya, sebagai kelanjutan dari banjir di tahun 1983, wilayah kerusakan yang ganas telah dilakukan survey guna menentukan jumlah perbaikan beton dasar saluran.

Indeks-indeks kerusakan, dihitung dari sejarah laju aliran di bendungan Glen Canyon digunakan Persamaan 3.9, seperti ditunjukkan dalam Tabel 3.4 dibawah ini.

Ketidakteraturan permukaan, pada setasiun 729.3, telah menyebabkan banyak lubang di dasar saluran yang telah diperbaiki khususnya di lubang sisi kiri menggunakan pipa. Indeks kerusakan untuk stasiun ini telah dihitung menggunakan asumsi ujung lingir sisi hilir dari lubang itu berfungsi sebagai undakan (*offset*). Barangkali asumsi yang dikemukakan berikut ini adalah salah. Ketidakteraturan di beberapa stasiun telah menjadi undakan aliran disebabkan oleh berkumpulnya kalsit di permukaan aliran. Kalsit terbentuk ketika air mengalir melalui retakan di dalam dinding dari beton rujukan.

Korelasi antara indeks kerusakan dengan kerusakan yang teramati mengikuti kecenderungan yang dapat diprakirakan. Jika indeks kerusakan kurang dari 5000, maka kerusakan adalah relatif kecil. Pada indeks yang lebih besar dari 10000, kerusakan adalah cukup luas dan sulit untuk diperbaiki.

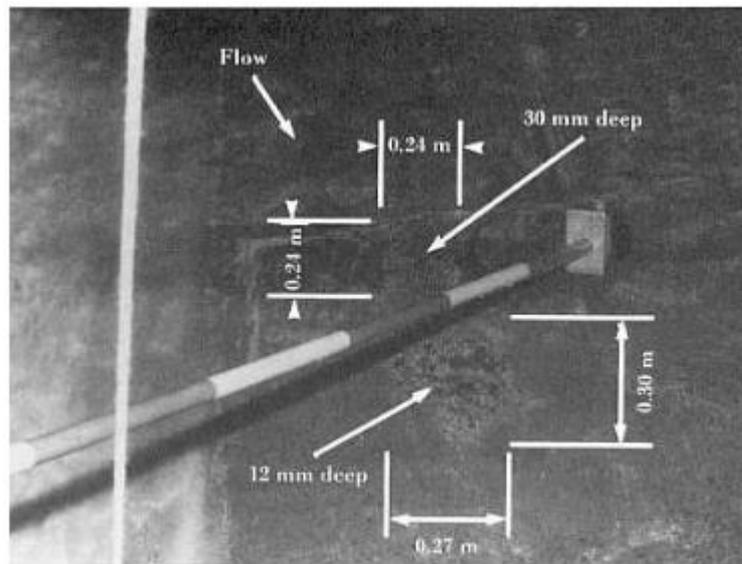
Kerusakan yang mengakibatkan malapetaka di pelimpah bendungan Glen Canyon nampaknya tidak dapat diprakirakan. Berdasarkan hasil survey yang menggunakan metode fotografi tidak mencatat kerusakan di undakan di stasiun 760,7 pada saat kejadian runtuhnya pelimpah bendungan di tahun 1981. Meskipun demikian, pada tanggal 6 Juni 1983, kerusakan sangat parah telah terjadi di lokasi tersebut di atas seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.9. Kerusakan diawali oleh kejadian menumpuknya kalsit setinggi 6,5 mm. Secara jelas, tumpukan telah tumbuh pada saat survey yang dilakukan pada tahun 1981 serta pada saat kejadian banjir di tahun 1983. Berdasarkan perhitungan, Indeks kerusakan untuk tinggi

tumpukan sebesar 6,5 mm di atas undakan adalah setara dengantinggi undakan sebesar 7 mm seperti tersaji dalam Gambar 3-10a. Dengan demikian, pada ukuran dan bentuk undakan yang hampir sama di lokasi yang sama di saluran curam menghasilkan besaran kerusakan yang sangat berbeda. Ujung akhir zona kerusakan dari lokasi tumpukan di sisi kiri dari undakan adalah lebih nampak dibanding di sisi kanannya, seperti tersaji dalam Gambar 3.9.

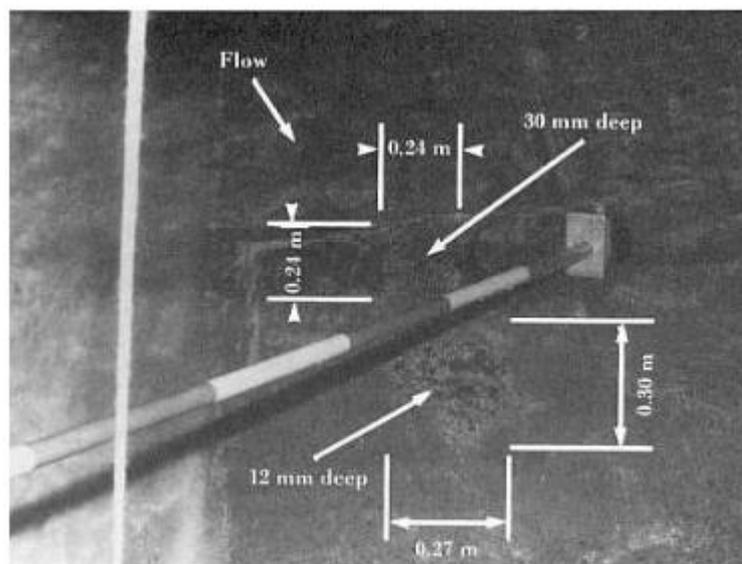


Gambar 3.9 *Bendungan Glen Canyon, terowongan pelimpah sebelah kiri. Kerusakan di stasiun 760,20 m, 6 Juni 1980*

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).



a. Awal kerusakan di stasiun 729,26 m (Fall, 1981)



b. Kerusakan berat karena kehilangan tambalan di stasiun 729,26 m setelah banjir 1983

Gambar 3.10 Bendungan Glen Canyon, terowongan sebelah kiri

Dirujuk dari "Cavitation in Chute and Spillways" yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Pada kedua contoh di atas, hal itu nampak bahwa pertumbuhan kerusakan yang progresif disebabkan oleh ketidakraturan permukaan saluran yang bukan merupakan mekanisme primer kerusakan yang menyebabkan malapetaka. Tubrukan yang diakibatkan oleh aliran berkecepatan tinggi yang menyebabkan permukaan saluran terkikis boleh jadi telah menjadi mekanisme yang sangat signifikan. Di samping itu, terbentuknya pusaran oleh karena aliran sekunder di belokan barangkali menjadi hal yang ditekankan sebagai penyebab kerusakan.

Evaluasi terhadap bentuk dan ukuran ketidakraturan permukaan saluran dalam pengamatan-pengamatan ini adalah sesuatu yang subyektif. Seluruh pengukuran yang berkaitan dengan tinggi dan kedalaman kerusakan telah disusun oleh surveyor agar secara visual dapat diprakirakan. Cetakan permukaan dasar saluran, yang mengikuti profil-profil yang teliti dan cermat serta terukur secara akurat dapat menghasilkan profil yang jauh lebih konsisten.

Tabel 3.4 Nilai rancangan dari potensial kerusakan dan indeks kerusakan

Damage	Damage potential	Damage index
Incipient	500	5000
Major	1000	10000
Catastrophic	2000	20000

Nilai kerusakan potensial yang dihitung menggunakan Persamaan 3.9, dengan parameter $t_0=0$, $t=22000$ jam. Nilai diberikan oleh indeks kerusakan.

Dirujuk dari "Cavitation in Chute and Spillways" yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Dua metode untuk menilai kerusakan pada saluran luncur pelimpah bendungan telah tersedia seperti diuraikan di atas. Pertama, jika diasumsikan bahwa total waktu operasi dari bangunan saluran luncur adalah sangat panjang, misalnya 22000 jam (lebih dari 2% dari waktu dalam setahun), maka hanya potensi kerusakan yang harus selalu diperiksa. Jika jumlah waktu operasi terhadap saluran luncur cukup pendek, maka indeks kerusakan harus selalu diperiksa. Potensi

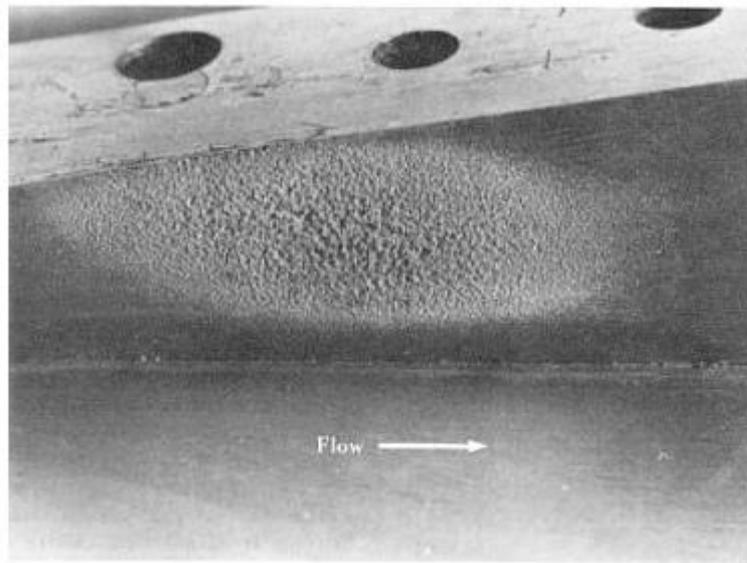
kerusakan atau indeks kerusakan harus lebih kecil daripada nilai-nilai seperti yang disajikan dalam Tabel 3.4. Hal ini dilakukan agar kerusakan di dasar saluran luncur dapat dihindari.

3.13 Pengenalan terhadap Kerusakan karena Kavitas

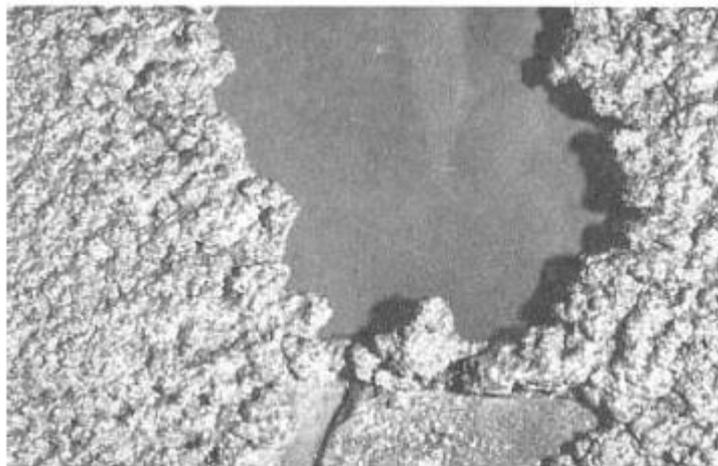
Pada saat kerusakan karena kavitas telah terjadi, maka sangat penting untuk mengetahui penyebab dari kerusakan tersebut sehingga tindakan perbaikan selanjutnya dapat dilakukan. Uraian berikut ini merupakan hasil pengamatan, yang akan menyediakan petunjuk untuk mengenali kerusakan karena kavitas.

Pada Bab 1 sebelumnya memberikan catatan bahwa kerusakan disebabkan oleh kavitas yang terutama disebabkan oleh gelombang tekanan yang bergerak sangat cepat melebihi kecepatan suara di dalam air. Pada saat kecepatan suara itu 10 atau 40 kali lebih besar dibandingkan kecepatan aliran, yang secara normal berkaitan dengan kerusakan, yang mana kerusakan nampaknya disebabkan oleh tekanan yang mengarah tegak lurus terhadap permukaan saluran aliran. Hal ini berarti bahwa arah aliran tidak dapat ditentukan secara sengaja oleh proses eksperimen di daerah kerusakan. Di samping itu, efek ini mempunyai dampak terhadap tekstur permukaan saluran luncur terhadap kerusakan.

Pada permukaan saluran yang terbuat dari baja, efek dari pecahnya gelembung uap air yang gelombang tekanan mengarah ke permukaan saluran secara tegak lurus dapat merusak teksturnya. Skala kerusakan yang berupa kekasaran permukaan, tergantung pada ukuran gelembung uap air kavitas yang dihasilkannya. Berdasarkan penelitian eksperimen di laboratorium, struktur dari kerusakan permukaan saluran berwujud jaring-jaring halus seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.11a, hal ini disebabkan oleh gelembung uap air yang berukuran kecil. Di sisi lain, pada dinding permukaan saluran luncur teksturnya lebih kasar, hal ini disebabkan oleh ukuran gelembung uap air yang lebih besar seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.11b.



3.11.a. *Struktur dari kerusakan permukaan saluran berwujud jaring-jaring halus*

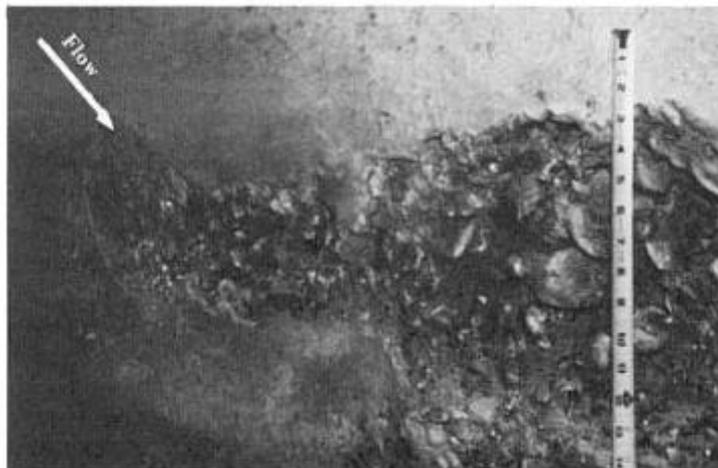


3.11.b *Struktur dari kerusakan permukaan saluran yang lebih kasar*

Gambar 3.11 *Tekstur kerusakan karena kavitasi di saluran yang terbuat dari baja*

Pengaruh dari pukulan gelombang tekanan arah tegak lurus terhadap permukaan beton yang akan menyebabkan terlepasnya lapisan semen sebagai pengikat terhadap agregat kasar dan halus. Hal ini berwujud dalam bentuk celah-celah

yang dalam di saluran luncur pelimpah bendungan. Hal itu nampak dari wujud berupa guratan-guratan layaknya cacing. Tampilan permukaan saluran berdasarkan hasil penelitian laboratorium yang berbeda menemukan bahwa kerusakan tidak signifikan seperti disajikan dalam Gambar 3.12, Tidak satu pun agregat terlepas dari tubuh saluran luncur.



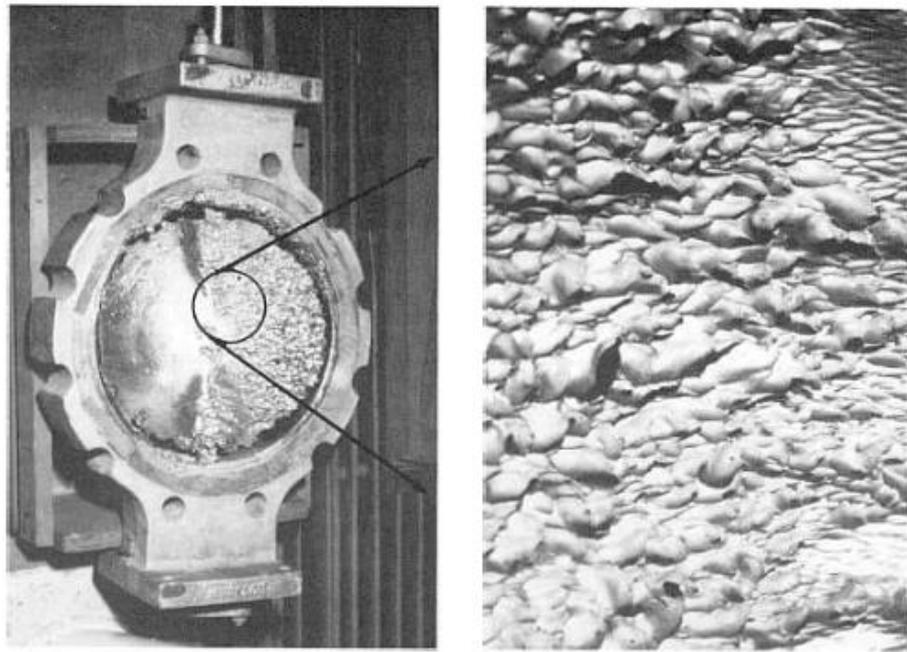
Gambar 3.12 *Kerusakan karena kavitasi di saluran curam yang konstruksinya berupa beton*

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Sulit untuk membedakan antara kerusakan tekstur yang disebabkan oleh kavitasi dan yang disebabkan oleh erosi, lazimnya berwujud terpisahnya pasir dari tubuh saluran, hal ini akan lebih dikenali jika saluran luncur terbuat dari lembaran baja seperti tersaji dalam Gambar 3.13. Pada kavitasi, arah kerusakan tidak dapat dideteksi yang nampak hanyalah tekstur permukaan menjadi lebih kasar. Erosi yang menyebabkan terpisahnya pasir dan air wujudnya berupa arah aliran yang nampak jelas di samping itu permukaan salurannya menjadi kasar yang lembut.

Pada permukaan saluran yang terbuat dari beton perbedaan kerusakan karena kavitasi, karena proses pembekuan yang mencair, dan kerusakan karena erosi adalah nyata. Kavitasi akan menyebabkan lembaran beton yang sudah dihaluskan

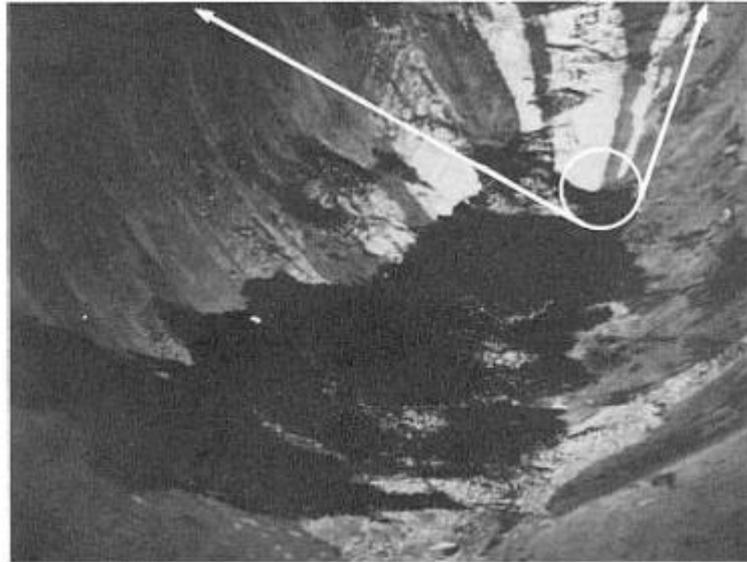
akan berwujud dan kasar di zona kerusakan seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.12a. Di samping itu, pada zona pembekuan yang dicairkan, lapisan agregat akan rusak dan profil yang dirusak bentuknya relatif rata, hal ini seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.14. Pada kasus kerusakan karena erosi yang menyebabkan pasir terpisah dari air, maka lapisan permukaan yang sudah dihaluskan oleh erosi akan dirusak yang wujudnya adalah berupa kekasaran yang lembut.



Gambar 3.13 *Kerusakan karena kavitasi di saluran curam pada katup kupu-kupu*

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Jika kerusakan karena kavitasi terjadi di struktur hidraulika, hal itu akan terjadi di lokasi yang sama pada bangunan hidraulik yang lain. Sebagai contoh, jika kerusakan karena kavitasi teramati di hilir dinding saluran lurus, hal itu terjadi di sisi hilir yang berbalikan dengan pintu (jika pelimpah bendungan menggunakan pintu, bukan pelimpah bebas), seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.14.

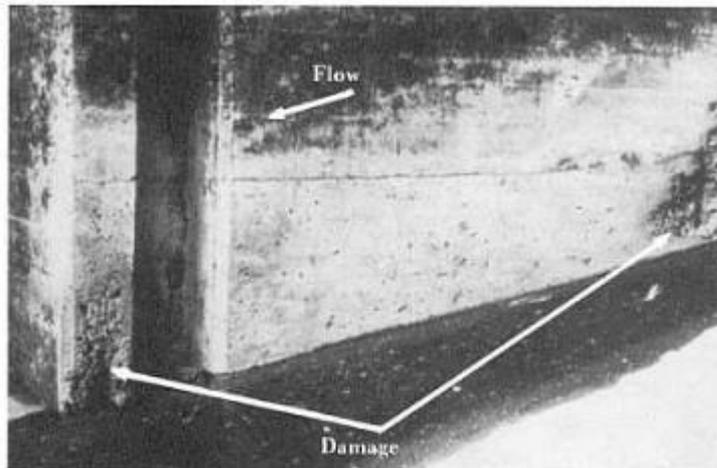


Gambar 3.14 *Kerusakan kavitasi di zona pembekuan*

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

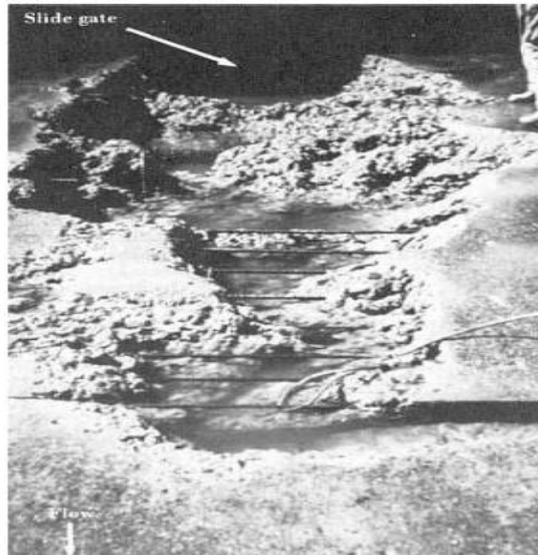
Kerusakan karena kavitasi selalu terjadi di sisi hilir dari sumber penyebabnya. Hal ini mempunyai dua implikasi yang penting. Pertama, harus terdapat sumber kavitasi dan yang kedua, bahwa kerusakan tidak dapat berkembang di sisi hulu sumber (pintu pelimpah). Lazimnya, sumber-sumber itu secara mudah dapat diidentifikasi. Permukaan yang tidak teratur, tumpukan kalsit, pintu ait, serta perubahan bentuk saluran lurus yang tiba-tiba di dalam aliran merupakan sumber terjadinya kerusakan.

Pusaran-pusaran arah membujur di dalam aliran diketahui juga menjadi sumber kavitasi yang dapat menyebabkan kerusakan. Pada umumnya, lokasi yang tepat dari sumber-sumber ini tidak dapat secara akurat ditetapkan. Salah satu contoh tipikal dari kerusakan karena kavitasi disebabkan oleh pusaran aliran arah membujur di dalam aliran melalui pintu air seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.16.



Gambar 3.15 Kerusakan kavitasi di hilir pintu pada pelimpah menggunakan pintu bukan pelimpah bebas

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).



Gambar 3.16 Kerusakan karena kavitasi disebabkan oleh pusaran aliran arah membujur di dalam aliran melalui pintu air

Dirujuk dari “Cavitation in Chute and Spillways” yang ditulis oleh Henry T. Falvey (1990).

Buku *Kavitasi Di Dasar Saluran Curam* ini disusun untuk membantu pemahaman pada pengetahuan dan teori yang mendasari kavitasi, yaitu konsep tentang kavitasi, parameter kavitasi, formasi kavitasi, teori pecahnya gelembung uap air, tekanan di dasar saluran curam, serta karakteristik kavitasi di permukaan saluran. Pembaca buku ini sebaiknya orang yang sudah pernah mempelajari materi yang berkaitan dengan mekanika fluida dan hidraulika, yang mana hal ini dapat membantu peningkatan pemahaman menjadi lebih dalam. Namun demikian bagi yang belum tetap masih dapat mengikuti isi buku ini serta memahaminya, karena di dalam buku ini disajikan banyak contoh kasus di lapangan.

Buku ini, merupakan buku teks yang dimaksudkan sebagai alat bantu pembelajaran serta referensi bagi mahasiswa, praktisi, serta pengambil keputusan yang terkait dengan bidang saluran curam. Buku ini sangat penting untuk mahasiswa Program S2 dan S3 Teknik Sipil, terutama yang mengambil spesialisasi Hidro. Buku ini dapat membantu mahasiswa dan perancang bendungan dalam mendesain Aerator di saluran lurus pelimpahnya. Buku ini dapat juga dibaca mahasiswa Teknik Mesin yaitu yang berkaitan dengan konsep dasar kavitasi, yang mana hal ini sangat erat kaitannya dengan materi Pompa dan Kompresi. Pada mahasiswa Program S2 Teknik Lingkungan, buku ini dapat mendukung materi tentang Proses Aerasi Alamiah yang merupakan bagian dari paradigma Teknologi Hijau (Green Technology).

Saluran curam di bangunan hidraulik banyak wujudnya, misalnya bendung, saluran lurus pelimpah bendungan, serta saluran buatan yang meluncur sangat curam dan panjang. Di saluran curam lamanya aliran berkecepatan sangat tinggi, di samping itu mempunyai tekanan yang sangat rendah yang mana hal ini merupakan salah satu indikator bakal terjadinya kavitasi.

Kavitasi dapat dijelaskan oleh kejadian-kejadian sebagai berikut. Pada saat aliran meluncur di saluran lurus pelimpah bendungan, pada jarak tertentu dari muara pelimpah maka kecepatan aliran menjadi sangat tinggi, sehingga tekanan menjadi sangat rendah bahkan mencapai sama dengan tekanan uap, maka terjadilah kavitasi. Pada saat tekanan sangat rendah terbentuklah gelembung mikroskopis, makin ke hilir saluran lurus gelembung makin besar ukurannya, yang mana gelembung itu adalah uap air maka makin ke hilir gelembung itu akan menuju ke tekanan aliran yang lebih tinggi, sehingga gelembung uap air itu akan pecah serta memancarkan gelembung energi yang sangat tinggi yang menambat dan membentur ke dasar atau dinding samping saluran lurus yang selanjutnya akan menyusunya. Kemudian dasar saluran lurus dimulai dari erosi atau lubang kecil dan menjeli lubang besar akhirnya akan menggerus dasar saluran lurus yang akhirnya meruntuhkan saluran lurus tersebut. Runtuhnya saluran lurus bangunan pelimpah akan menyebabkan bendungan sangat terancam keruntuhan pula, yang mana akan membahayakan kehidupan masyarakat yang ada di hilir bendungan. Oleh karena itu, kavitasi harus dicegah, salah satu teknik yang digunakan adalah dengan memasang aerator di dasar saluran curam.

Selamat membaca....

KAVITASI

DI DASAR SALURAN CURAM

Penerbit ANDI
Jl. Sawah 44 Yogyakarta
50132 Telp. (0271) 431000
www.andipublisher.com



Daftarlah ke toko buku atau hubungi kami di email: info@andipublisher.com