# BAB II

#### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Grekul dan Bark (2001) telah menjabarkan tentang efek erosi akibat kavitasi yang terjadi pada *runner* sebuah turbin dengan menggunakan model dan bantuan *software fluent* 6.1. Dalam penelitiannya erosi akibat kavitasi pada sebuah *runner* yang paling banyak ditemukan adalah pada bagian sisi ujung (*leading edge*) dari *runner* sebuah turbin air, pada daerah tersebut didapatkan bahwa terdapat permukaan *runner* yang terabrasi akibat terjadinya kavitasi dan hal ini biasanya disebabkan oleh sudut serang yang kurang cocok.

Avellan (2008) dalam penelitiannya yang menggunakan sebuah turbin dengan ukuran yang lebih kecil (model) yang dilengkapi alat particle image velocity (PIV) yang berfungsi untuk mendeteksi diameter dan kecepatan vortex yang terjadi di dalam draft tube. Salah satu hasil dari yang didapatkan pada penelitian ini adalah pengaruh bilangan thoma ( $\sigma$ ) terhadap diameter vortex yang terjadi pada draft tube yakni semakin besar bilangan thoma ( $\sigma$ ) maka diameter vortex yang terjadi justru semakin kecil hal tersebut dikarenakan terjadinya perubahan tekanan aksial yang signifikan dalam celah uap ada di dalam pusaran.

#### 2.2 Turbin air

#### 2.2.1 Definisi Turbin Air

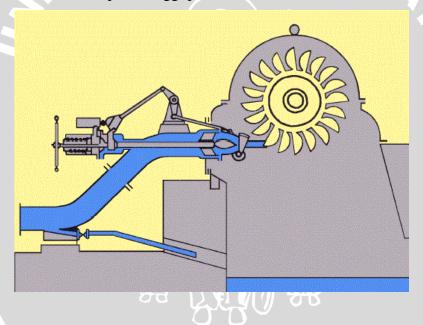
Turbin air adalah mesin konversi energi yang berfungsi untuk merubah mengkonversi energi potensial (*head*) yang dimiliki oleh air ke bentuk energi mekanik pada poros turbin. Enegi potensial yang tersimpan pada air yang diam pada ketinggian tertentu, energi tersebut dapat menjadi energi kinetik secara perlahan-lahan dengan mengalirkan ke tempat yang lebih rendah.

#### 2.2.2 Klasifikasi Turbin air

Turbin air dapat diklasifikasikan dalam beberapa cara namun yang paling umum adalah berdasarkan perubahan momentum fluida kerjanya, berdasarkan klasifikasi ini turbin air dapat dibedakan menjadi 2 golongan yaitu:

#### 2.2.2.1 Turbin Impuls

Turbin impuls adalah turbin tekanan sama karena aliran air yang keluar dari nosel tekanannya adalah sama dengan tekanan atmosfir sekitarnya. Semua energi tinggi tempat dan tekanan ketika masuk ke sudu jalan turbin dirubah menjadi energi kecepatan. Pada turbin impuls energi potensial air diubah menjadi energi kinetik pada nozzle. Air keluar nozzle yang mempunyai kecepatan tinggi membentur sudu turbin. Setelah membentur sudu arah kecepatan aliran berubah sehingga terjadi perubahan momentum (impulse). Akibatnya roda turbin akan berputar. Seluruh energi yang tersedia di dalam alirannya diubah oleh nozzle menjadi energi kinetik pada tekanan atmosfer sebelum fluida menyentuh sudu-sudu bergerak seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Turbin impuls cocok untuk head yang tinggi dengan kapasitas air yang relatif rendah. Jenis turbin ini mengubah head yang tinggi menjadi semburan kecepatan tinggi pada nozzle.



Gambar 2.1: Turbin Impuls Sumber :Dietzel, 1996: 8

Macam-macam turbin impuls antara lain sebagai berikut:

#### 1. Turbin pelton.

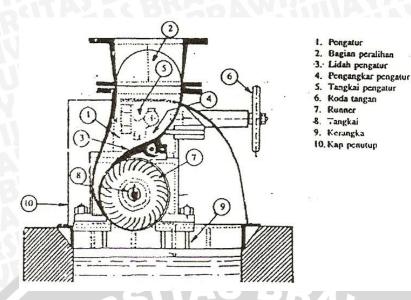
Turbin ini memiliki 2 bagian utama, yaitu runner dan *nozzle* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2. Runner terdiri dari poros, 1 tangki piringan dan beberapa mangkok. Turbin pelton terutama digunakan untuk pemanfaatan potensi hidro tinggi (> 300 m) dengan aliran kecil.



Gambar 2.2: Turbin Pelton Sumber: http://turbin-pelton.blogspot.com

### Turbin cross flow (turbin Michael Banki).

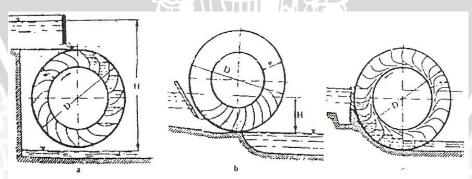
Turbin ini disebut juga turbin arus melintang (cross flow). Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3, kontruksi turbin ini sangat sederhana terdiri dari sebuah runner yang menyerupai sangkar tupai dan nozzle. Prinsip kerjanya : air yang keluar dari nozzle ditumbukan kearah runner sehingga terjadi perubahan energi kinetik air menjadi energi mekanik pada poros runner. Turbin ini banyak digunakan pada head rendah hingga menengah, untuk kapasitas hingga 5 m<sup>3</sup>/s. Keuntungan, kontruksinya sederhana, putaran operasi cukup tinggi dan efisiensi stabilnya pada perubahan beban hingga 40% dan beban maksimum.



Gambar 2.3:Sistem Turbin Michael-Banki Sumber:Dietzel, 1996: 35.

#### 3. Kincir air.

Pada turbin air, air ditumbukan ke mangkuk-mangkuk yang dipasang pada piringan motor (roda putar), sehingga terjadi perubahan energi kinetik menjadi energi mekanik. Kincir air bekerja pada putaran rendah sehingga memerlukan percepatan putaran dengan perbandingan putaran yang tinggi untuk mencapai putaran generator. Kincir air memiliki ciri, kontruksi sederhana dan diameter besar. Pada penggunaannya kincir air banyak digunakan untuk *head* dan kapasitas kecil karena diameter besar pada putaran rendah. Pada gambar 2.4 merupakan salah satu contoh kincir air.



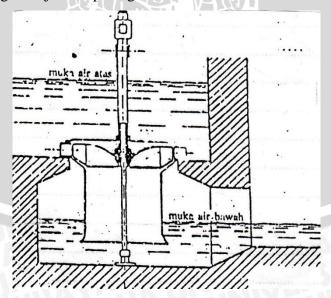
Gambar 2.4: Kincir Atas dan Kincir Bawah Sumber: Dietzel, 1996: 14.

#### 2.2.2.2 Turbin Reaksi

Berbeda dengan turbin impuls, sudu pada turbin reaksi mempunyai profil khusus yang menyebabkan terjadinya penurunan tekanan air selama melalui sudu.

Perbedaan tekanan ini memberikan gaya pada sudu sehingga *runner* dapat berputar. Turbin yang bekerja berdasarkan prinsip ini dikelompokkan sebagai turbin reaksi. *Runner* turbin reaksi sepenuhnya tercelup dalam air dan berada dalam rumah turbin. Pada saat beroperasi sudu putar (*runner*) turbin reaksi terendam di dalam air dan bertekanan. Sudu *runner* mempunyai profil sehingga perbedaan tekanan antara satu sisi dengan sisi lainnya sehingga menimbulkan gaya, seperti sayap pesawat terbang. Gaya tersebut yang menyebabkan *runner* berputar. Turbin reaksi merupakan turbin/mesin yang sangat cocok untuk laju aliran yang tinggi dan *head* yang rendah seperti yang sering ditemui pada pusat listrik tenaga air dengan sungai yang dibendung, oleh karena itu turbin reaksi sangat banyak dimanfaatkan di PLTA yang ada di Indonesia. Ciri khas dari turbin reaksi adalah mempunyai sudusudu yang biasa diatur sehingga biasa mengkonversikan energi air dengan baik.

Untuk Turbin reaksi *runner* dikelilingi selubung (rumah keong) yang seluruhnya diisi oleh fluida kerja. Jatuh tekanan dan kecepatan relatif fluida berubah saat melalui *runner* seperti yang ditunjukkan pada gambar. Sudu pengarah berlaku sebagai *nozzle* untuk memberi percepatan aliran dan membelokkan aliran kearah yang tepat saat fluida masuk ke dalam *runner*. Sebagian energi fluida diubah menjadi energi kinetik dengan mengalirnya fluida melalui sudu arah (*guide vane*) yang dapat disetel sebelum memasuki rotor dan perubahan selebihnya terjadi di rotor, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5.

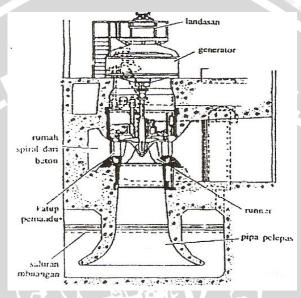


Gambar 2.5: Turbin Reaksi Sumber:Patty, 1995: 164

Berikut adalah beberapa contoh dari turbin reaksi:

#### 1. Turbin Francis

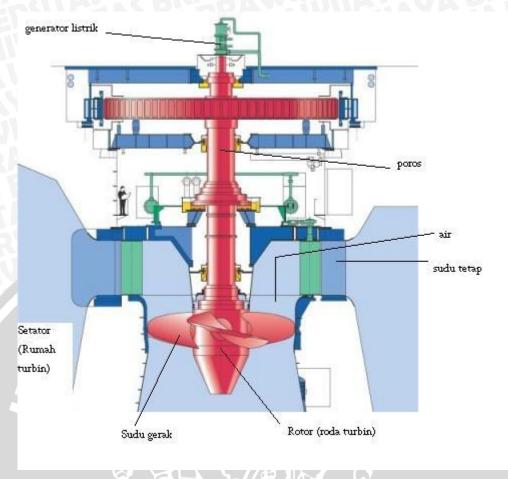
Turbin Francis yaitu turbin yang dikelilingi dengan sudu-sudu pengarah dan semua terbenam dalam air. Turbin Francis digunakan untuk pemanfaatan potensi menengah (dari beberapa puluh meter sampai 100 m). Jenis kontruksi turbin ditemukan oleh orang Amerika yang bernama Francis dan sudah bisa dibuat dengan kecepatan yang tinggi. Pada gambar 2.6 merupakan contoh dari turbin Francis.



Gambar 2.6: Turbin Francis Sumber:Patty, 1995: 165

#### 2. Turbin Kaplan

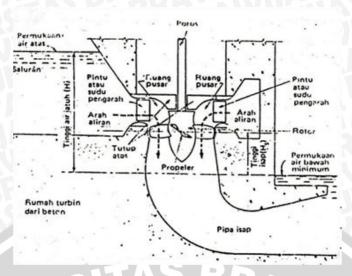
Turbin Kaplan adalah jenis turbin *propeller* dengan posisi sudu-sudu arah yang dapat diatur posisinya. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7, pengatur sudu roda jalan *(rotor)* dengan menggunakan tenaga hidrolik yang terletak pada poros turbin. Seperti yang ditimbulkan pada gambar untuk aliran-aliran turbin kaplan, fluida mengalir melewati sudu arah masuk dan menjadi kecepatan tangensial dalam gerakan olakan *(swirl)* sebelum mencapai *rotor*-aliran yang melewati rotor hampir seluruhnya merupakan komponen aksial. Baik sudu arah masuk maupun sudu turbin dapat diatur dengan mengubah sudu atur *(setting angle)* untuk menghasilkan kecepatan yang paling baik (keluaran optimum) untuk sudu kondisi operasi spesifik. Sebagai contoh *head* operasi yang tersedia mungkin akan berubah dari setiap musim dan laju alir yang melewati *rotor* akan bervariasi.



Gambar 2.7: Turbin kaplan Sumber: http://denosan.com

#### **3. Turbin Propeler**

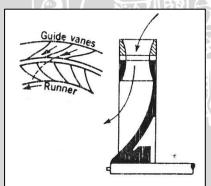
Turbin ini digunakan untuk pemanfaatan potensi hidro yang memiliki head rendah hingga menengah (beberapa puluh meter) dengan kapasitas aliran besar dan putaran operasinya tidak terlalu tinggi. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8 turbin ini memiliki 3 bagian utama yaitu runner, guide blade (sudu pengarah) dan rumah turbin (casing).



Gambar 2.8: Turbin propeler Sumber: Dietzel, 1996: 40

#### **Turbin Francis** 2.2.3

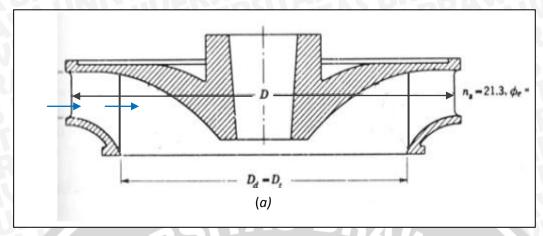
Turbin francis merupakan salah satu turbin reaksi. Pada awalnya turbin francis didesain dengan tipe aliran murni radial yang artinya aliran air sisi masuk ke sudu gerak tegak lurus dengan poros turbin atau alirannya sejajar dengan arah putaran turbin. Turbin Francis menggunakan sudu pengarah yang berfungsi untuk mengalirkan air masuk ke sudu gerak secara tangensial. Pola aliran dari turbin francis bisa dilihat pada gambar 2.9 berikut ini:

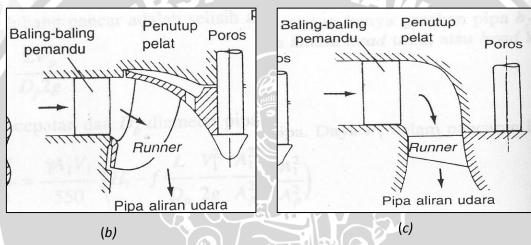


Gambar 2.9 : pola aliran turbin francis Sumber: Daugherty, 1986: 446

Pada awalnya desain diameter dalam dari sudu gerak turbin francis hampir sama besarnya dengan diameter luarnya. Seiring dengan perkembangan teknologi, untuk membuat runner yang lebih kompak maka diameter dalam dari desain runner yang sebelumnya dikurangi dan aliran air keluar sudu selain secara radial juga terdapat komponen aliran aksial. Sehingga turbin francis juga disebut turbin aliran campuran

(mixed flow). Untuk lebih jelasnya mengenai perbedaan antara turbin francis dengan turbin radial dan turbin aksial bisa dilihat pada gambar 2.10 dibawah ini:





Gambar 2.10: (a) *runner* turbin radial. (b)turbin Francis(*mixed flow*) (c) turbin aksial

Sumber: Daugherty, 1986: 477

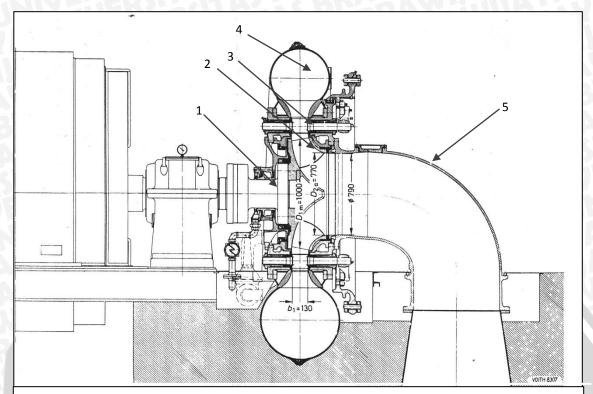
Pada gambar 2.10 (a) merupakan gambar sudu gerak dari turbin radial, dimana yang menjadi ciri khas dari aliran pada turbin ini adalah arah aliran masuknya secara radial dan arah keluar sudu geraknya juga masih radial. Pada gambar tersebut juga bisa dilihat bahwa baik tepi sudu sebelah luar maupun dalam bentuknya lurus sejajar dengan poros turbin.

Pada gambar 2.10 (b) merupakan gambar dari turbin Francis. Pada gambar tersebut bisa dilihat bahwa aliran pada sisi masuk sudu pengarah adalah radial namun ketika telah melewati sudu gerak turbin, arah alirannya berubah menjadi miring. Posisi miring ini menunjukkan bahwa aliran pada sisi keluar mempunyai dua komponen yaitu komponen radial dan komponen aksial. Selain itu bentuk sisi keluar sudu gerak turbin Francis tidak lurus seperti pada turbin radial tetapi bentuknya melengkung.

Pada gambar 2.10 (c) merupakan gambar turbin dengan aliran aksial. Pada turbin aksial, aliran masuk pada sisi masuk sudu gerak secara aksial dan keluar dari sudu gerak secara aksial pula. Pada gambar tersebut juga bisa dilihat bahwa posisi sudu gerak pada turbin aksial tegak lurus terhadap poros turbin sehingga aliran menyentuh sudu gerak secara aksial. Salah satu contoh dari turbin aksial adalah turbin Kaplan.

Turbin Francis termasuk jenis turbin reaksi, sehingga turbin ini bisa dipasang baik di atas maupun di bawah permukaan air bawah. Turbin francis juga dapat pasang dengan kedudukan poros pada posisi vertikal maupun pada posisi horizontal. Turbin ini biasanya digunakan pada potensi hidro yang memiliki *head* menengah (dari beberapa puluh meter sampai 100 m) dengan kapasitas aliran menengah sehingga turbin Francis memiliki putaran operasi yang tidak terlalu tinggi, namun lebih tinggi dari turbin Kaplan.

Perlu diketahui bahwa turbin Francis prinsip kerjanya mirip dengan turbin Kaplan, namun terdapat perbedaan dari segi konstruksi sudu-sudu jalan dan beberapa bagian lainnya. Selain itu pada turbin Kaplan sudu geraknya bisa dirubah posisinya sedangkan pada turbin Francis posisi sudu geraknya tidak bisa dirubah. Turbin Francis memiliki karakteristik yang baik yaitu memiliki efisiensi yang tinggi didekat kapasitas maksimum, namun efisisiensinya akan cenderung menurun untuk perubahan pembebanan yang besar, sehingga turbin Francis cocok untuk instalasi pembangkit dengan pembebanan konstan. Skema Francis dapat ditunjukkan pada gambar 2.11 berikut:



#### Keterangan:

- 1. Poros turbin
- Sudu gerak (runner)
- Sudu tetap (guide vane)
- Spiral casing
- Draft tube

Gambar 2.11: Skema turbin Francis poros horizontal Sumber: Dietzel, 1996: 47

#### Prinsip kerja Turbin Francis

Turbin Francis bekerja dengan memakai proses tekanan pada waktu air masuk ke roda jalan, sebagian dari energi jatuh atau tinggi jatuh (head) yang telah bekerja di dalam sudu pengarah diubah menjadi kecepatan arus masuk (energi kinetik). Sisa energi tinggi jatuh (head) bekerja di sudu jalan dengan semaksimal mungkin. Dalam hal ini energi kinetik air yang bekerja di sudu jalan mendapat energi reaksi (gaya reaksi) dari sudu jalan tersebut. Pada sisi sebelah luar roda jalan terdapat tekanan serendah-rendahnya atau kurang dari 1 atm dan kecepatan aliran yang tinggi. Di dalam pipa buang, kecepatan aliran berkurang dan tekanannya akan bertambah sehingga air bisa dialirkan keluar lewat saluran air bawah. Dengan tekanan seperti daerah sekitar (tekanan sekitar). Pipa isap ini mempunyai tugas mengubah energi kecepatan menjadi energi tekanan.

Turbin ini mempunyai 3 bagian utama yaitu runner, guide vane (sudu pengarah), dan rumah turbin (casing). Runner terdiri dari poros dan sudu turbin dimana fungsi sebagai pengarah arah aliran air dan pengatur katup dari casing ke runner. Sedangkan casing merupakan saluran yang mempunyai bentuk rumah keong dengan penampang melintang lingkaran dan trapesium.

#### 1. Runner

Runner merupakan bagian yang bergerak atau berputar yang terdiri dari poros dan sudu turbin. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.12, runner berfungsi untuk mengubah energi kinetik menjadi energi mekanik.



Gambar 2.12: Runner Sumber: http://www.asnt.org/mar08basicsfig1.jpg

#### 2. Guide vane

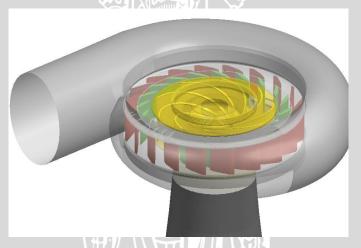
Guide vane berfungsi sebagai pengarah aliran air dari katup pengatur kapasitas dari casing ke runner. Pada turbin Francis posisi guide vane bisa diatur sedemikian rupa sesuai dengan kebutuhan. Contoh guide vane (bagian yang berwarna kuning) ditunjukkan pada gambar 2. 13.



Gambar 2.13: Guide vane Sumber: www.globalpowerandenergi.com/images\_francis.bmp

#### 3. Casing

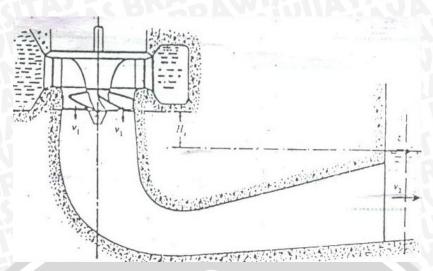
Casing merupakan saluran yang mempunyai rumah siput dengan bentuk penampang melintang lingkaran. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.14, bagian ini berfungsi menampung dan membagi fluida dari pipa pesat ke sudusudu jalan dan memaksimalkan energi tekan.



Gambar 2.14: Casing Sumber: www.globalpowerandenergi.com/images\_spiral\_case.bmp

## 4. Draff Tube

Draff tube berfungsi meneruskan air turbin ke saluran pembuangan dengan menggunakan tinggi air dan jatuh air. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.15, draff tube juga digunakan untuk menurunkan kecepatan yang berasal dari sudusudu selang yang mempunyai tekanan kurang dari 1 atmosfer.



Gambar 2.15: Draft Tube Sumber: Dietzel, 1996: 46

#### 2.3 Kavitasi

## 2.3.1 Pengertian Kavitasi

Salah satu masalah yang harus diatasi dalam pengoperasian turbin air adalah kavitasi. Kavitasi adalah suatu gejala fisik yang dialami oleh cairan, pada saat cairan mendekati tekanan uap, misalnya pada kondisi hampa udara. Pada saat tekanan turun menjadi tekanan uap, air mulai menguap pada saat yang sama, gas-gas yang larut secara normal juga mulai bebas sehubungan dengan tekanan rendah. Jadi, pada air yang mengalir, gelembung-gelembung kecil (minute microscopic bubbles) terbentuk yang berisi uap dan gas. Gelembung itu dapat disebut kavitasi di dalam aliran. Gelembung tersebut muncul terus menerus dalam jumlah besar. Gelembung ini dapat dapat melekat pada permukaan yang padat dan membentuk suatu rongga dekat ke permukaan atau mereka bisa terangkut bersama aliran melalui daerah-daerah dimana tekanan yang tinggi mulai terjadi.

Hasil dari lenyapnya gelembung akan menghasilkan merupakan suatu gelombang kejut yang sama dengan pukulan gelombang air, tetapi dengan suatu periode yang sangat pendek dan hanya mempengaruhi sebuah ruang pendek, sebelum ditekan oleh sejumlah masa air yang mengelilingi. Dengan jumlah jutaan gelembung yang lenyap, akibat umum adalah akan membuat pulsa-pulsa dengan frekuensi tinggi di daerah yang menyebabkan kelelahan dari suatu proses dari pengikisan logam atau beton secara berangsur-angsur pada permukaan. Disamping terjadi pengikisan juga menimbulkan suara dan getaran-getaran dari mesin dan hasil akhirnya adalah penurunan efisiensi mesin.

#### 2.3.2 Tipe-tipe kavitasi

Ada beberapa cara pengklasifikasian perbedaan bentuk penampilan dari kavitasi. Sebagai contoh suatu cara yang didasarkan pada kondisinya dimana pada kondisinya kavitasi terjadi, yakni kavitasi dalam suatu aliran, kavitasi pada suatu benda tercelup yang bergerak, dan kavitasi dengan tanpa aliran fluida yang mencolok. Adapan cara lain yang digunakan untuk mengklasifikasikan kavitasi adalah menurut karakter fisik dasarnya. Dengan mengkombinasikan kedua cara tersebut, maka kavitasi bisa dibagi menjadi empat kelompok seperti tersebut di bawah ini:

- 1. Kavitasi berpindah (travelling cavitation),
- 2. Kavitasi tetap (fixed cavitation),
- 3. Kavitasi pusaran (vortex cavitation),
- 4. Kavitasi getaran (vibratory cavitation).

# 1. Kavitasi dalam Suatu Aliran dengan Tipe Kavitasi Berpindah (Travelling Cavitation)

BRAWA

Kavitasi berpindah adalah suatu tipe kavitasi yang terbentuk dari gelembunggelembung transien yang berbeda dalam cairan dan bergerak bersama-sama cairan tersebut sembari mereka berekspansi, mengkerut dan kemudian hancur/lenyap. Gelembung transien berpindah yang demikian timbul pada titik-titik yang bertekanan rendah yang terletak disepanjang batas permukaan material padat atau berada pada bagian dalam cairan apakah pada inti gerakan gelembung atau dalam daerah turbulen tinggi dalam suatu bidang geser turbulen. Perpindahan dari gelembunggelembung yang demikian adalah ciri khusus dari gelembung transien yang lain.

Jika gelembung melewati daerah yang bertekanan lebih rendah maka ukuran gelembung akan membesar. Jika gelembung melewati daerah yang bertekanan lebih tinggi maka gelembung tersebut akan menyusut ataupun lenyap bila tekanan melebihi tekanan penguapannya. Peristiwa pembentukan dan penghancuran gelembung-gelembung ini akan mengakibatkan terjadinya pemulsaan atau denyutan tekanan.

### 2. Kavitasi dalam Suatu Aliran dengan Tipe Kavitasi Tetap (Fixed Cavitation)

Istilah kavitasi tetap dimaksudkan untuk situasi yang kadang-kadang mengembangkan gelembung setelah awal pembentukan gelembung tersebut, dimana aliran cairan terbelah dengan adanya permukaan batas dari benda padat yang tercelup

BRAWIJAYA

dalam aliran tersebut atau suatu lapisan aliran yang membentuk suatu rongga atau gelembung yang melekat pada permukaan batas dari benda padat tersebut. Kavitasi tetap kadang-kadang memiliki bentuk penampilan seperti permukaan didih turbulen tinggi. Dalam kasus lain permukaan antara cairan dan permukaan gelembung yang besar adalah sangat halus beraturan hingga menjadi tembus cahaya. Cairan yang berdekatan dengan permukaan gelembung yang besar tersebut ternyata mengandung gelembung-gelembung transien yang berpindah tersebut tumbuh atau mengembang dengan sangat cepat sampai mendekati ukuran maksimumnya pada ujung bagian bawah dari gelembung utama dan akhirnya menghilang.

Baik kavitasi transien berpindah dan kavitasi tetap memiliki suatu hal yang umum, bentuk gelembung untuk dapat menghilangkan tegangan yang telah dibangkitkan dalam cairan pada ujung aliran bagian atas dari daerah kavitasi. Pada umumnya, kavitasi berpidah adalah lebih sederhana dari kedua tipe tersebut. Walaupun demikian, kiranya cukup jelas bahwa mungkin ditemui kesulitan untuk membedakan antara suatu kasus kavitasi berpindah murni dan kavitasi tetap yang memiliki gelembung-gelembung kecil berpindah yang terangkut dalam cairan sepanjang *interface* gelembung yang terisolasi (gelembung utama).

#### 3. Kavitasi dalam Suatu Aliran dengan Tipe Kavitas Pusar (Vortex Cavitation)

Dalam kavitasi pusar gelembung-gelembung ditemukan pada inti pusaran yang membentuk kawasan geser tinggi. Tipe kavitasi ini mungkin nampak seperti kavitasi tetap ataupun kavitasi berpindah. Kavitasi pusar adalah salah satu dari tipe dari tipe-tipe kavitasi yang dulu mula-mula teramati, karena kavitasi demikian sering terjadi pada ujung sudu dari *propeller* kapal laut. Untuk itulah kavitasi jenis ini sering dikenal dengan nama kavitasi puncak (*tip cavitation*). Pada kavitasi puncak yang terjadi pada ujung propeller kapal dapat dicatat bahwa apabila dipandang relatif terhadap propeller yang sedang berputar, kavitasi tersebut mencapai kondisi aliran yang lebih steadi dibandingkan terhadap tipe-tipe kavitasi sebelumnya. Kavitasi puncak tak terbatas pada jenis *propeller* terbuka akan tetapi juga terjadi pada *propeller* bercelah sebagaimana ditemui pada pompa *propeller* yang dipasang pada ujung depan *hydrofoil*.

Contoh lain dari kavitasi pusar ini dapat ditemui pada aliran sekitar bagian bawah tonjolan pembelok arah aliran air (baffle piers) dari pintu limpah (spillway chutes). Kavitasi pusar pada kawasan pemisahan dari benda dengan bentuk bagian

depannya rata dengan kemiringan bertingkat mungkin juga merupakan tingkat permulaan dalam pembentukan gelembung tetap. Kavitasi pusar mungkin terjadi juga pada permukaan-permukaan batas dari pancaran atau semburan air terendam.

Berdasarkan penjelasan diatas, dapat disimpulkan bahwa kavitasi tipe ini akan menimbulkan kerusakan hanya jika hancurnya gelembung terjadi pada atau sangat dekat dengan permukaan batas. Sebagai contoh kerusakan yang diakibatkan oleh kavitasi pusar adalah kerusakan pada ujung sudu turbin atau pompa *propeller* akibat terjadinya kavitasi puncak.

# 4. Kavitasi Tanpa Adanya Suatu aliran yang Menyolok dengan Tipe Kavitasi Vibrasi (Vibratory Cavitation)

Tipe-tipe kavitasi yang telah dibahas sebelumnya memiliki ciri utama, yakni, bahwa suatu elemen cairan khusus melewati kawasan kavitasi hanyalah sekali saja. Kavitasi vibrasi adalah tipe lain dari kavitasi yang tidak memiliki karakteristik yang demikian. Kalaupun kadang-kadang kavitasi vibrasi diikuti dengan adanya aliran yang kontinyu, kecepatan aliran tersebut adalah demikian rendah sehingga suatu elemen tertentu cairan ditampilkan untuk berkali-kali siklus kavitasi (dalam waktu milidetik). Dalam kavitasi vibrasi gaya yang menyebabkan tumbuhnya kavitasi kavitasi dan juga menyebabkan lenyapnya kavitasi tersebut karena adanya pulsa tekanan, dengan amplitude dan frekuensi yang tinggi, yang terus menerus dalam cairan. Pulsa tekan tersebut dibangkitkan oleh suatu benda padat yang tercelup atau terendam dalam cairan itu bergetar normal terhadap permukaan dan membentuk gelombang tekanan dalam cairan tersebut. Kavitasi tak akan terbentuk kecuali kalau amplitude variasi tekanan adalah cukup besar untuk menyebabkan tekanan turun sampai atau dibawah tekanan penguapan cairan tersebut. Karena daerah tekan vibrasi adalah karakteristik dari kavitasi tipe ini, maka kavitasi yang demikian disebut kavitasi vibrasi.

Dua aspek penting dari kavitasi vibrasi mungkin dipertimbangkan secara terpisah:

- a. Karakteristik dari permukaan yang mengalami vibrasi yang menghasilkan daerah tekanan yang berosilasi bersama-sama dengan karakteristik pola gelombang yang dihasilkan.
- b. Efek-efek dari daerah tekan berosilasi pada cairan dan pada gelembung yang dibentuk.

Sebagai contoh produk yang mungkin dari suatu permukaan penggerak kavitasi vibrasi adalah *cylinder liner* dari sebuah motor *diesel*. Operasi dari mesin tersebut mungkin menyebabkan dinding silinder bergetar apakah pada kecepatan motor tersebut atau pada frekuensi alamiahnya. Vibrasi yang demikian akan memproduksi serentetan gelombang tekan dalam air jaket pendingin silinder. Apabila amplitudo dari vibrasi cukup besar, mungkin akan menyebabkan kavitasi vibrasi. Kavitasi pada permukaan dari benda uji suatu peralatan vibrasi dinamo presisi adalah kavitasi umum dari jenis yang kedua. Sisanya adalah kavitasi yang diproduksi secara ultra sonik pada suatu permukaan tranduser akustik, sebagaimana digunakan dalam sistem sonar, atau pada puncak-puncak suatu sistem gelombang berdiri yang dihasilkan oleh pemfokusan kumpulan gelombang suara dari beberapa tranduser atau radiator akustik dalam suatu bodi cairan.

#### 2.3.3 Efek-Efek Kavitasi

Kavitasi merupakan hal yang sangat penting sebagai konsekuensi dari efekefeknya. Kavitasi bisa merusak permukaan benda padat yang berbatasan dengan aliran dengan memindahkan material dari permukaan tersebut. Telah terbukti bahwa kavitasi dapat merusak segala tipe material padat, yakni semua logam, baik logam lunak ataupun logam yang keras, baik logam rapuh maupun logam ulet. Material lain seperti karet, kwarsa, beton, plastik, gelas adalah juga yang demikian rentan tehadap kerusakan karena kavitasi. Efek-efek kavitasi dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori umum:

- a. Efek-efek yang dapat menghasilkan modifikasi hidrodinamika aliran fluida, seperti timbulnya dan pecahnya gelembung-gelembung uap air. Efek-efek hidrodinamik dari kavitasi menyebabkan tergangunya kontinuitas fase cair akibat timbulnya gelembung-gelembung dalam cairan sehingga volume dari gelembung tersebut mengambil tempat yang seharusnya ditempati oleh cairan.
- b. Efek-efek yang dapat menghasilkan kerusakan pada permukaan benda-benda padat yang berada dalam aliran, seperti terjadinya erosi terhadap *runner* turbin.
- c. Efek-efek lain yang mungkin atau tidak mungkin dibarengi oleh adanya modifikasi yang jelas dari aliran hidrodinamik atau adanya kerusakan pada permukaan benda padat yang berada dalam aliran, misalnya terjadinya getarangetaran, timbul suara bising dan turunnya efisiensi turbin.
  - Penurunan Efisiensi turbin ini dikarenakan oleh kavitasi yang terbentuk mengambil ruang yang seharusnya terisi oleh air dan mengurangi masa

BRAWIJAYA

- aliran yang seharusnya menghantam runner sehingga menurunkan daya mekanis pada poros turbin.
- Gelembung uap yang terus menerus terbentuk dan melewati lingkungan yang tekanannya lebih besar akan pecah dan menimbulkan shockwave kepada lingkungan sekitar mengakibatkan getaran dan suara gemuruh pada turbin.

### 2.3.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kavitasi

- 1. Tekanan udara luar dimana instalasi dipasang.
- 2. Temperatur fluida yang digunakan. Temperatur fluida yang digunakan diusahakan serendah mungkin sehingga tekanan penguapannya akan naik.
- 3. Kecepatan aliran disisi buang sebaiknya diusahakan serendah mungkin agar perbedaan tekanan tidak terlalu tinggi.
- 4. Kerugian akibat gesekan fluida dengan dinding saluran. Belokan-belokan tajam harus dihindarkan untuk mempertahakan hrga yang minimum dari kerugian akibat gesekan fluida dengan dinding pipa.

#### 2.3.5 Kavitasi pada Turbin Air

Ketidak uniforman aliran dalam mesin-mesin fluida dapat menyebabkan perbedaan tekanan pada aliran tersebut, walaupun dalam suatu penampang tertentu, bervariasi secara meluas. Pada sisi tekanan rendah dari sudu-sudu turbin air tekanannya dapat menjadi lebih rendah dari tekanan atmosfer. Walaupun demikian pada cairan yang ada disekitar sisi bertekanan rendah tersebut, sulit untuk mencapai tekanan sampai lebih rendah dari penguapannya. Apabila pada suatu titik dicapai tekanan penguapannya maka cairan akan mendidih dan gelembung-gelembung uap yang berukuran kecil akan terbentuk dalam jumlah yang banyak. Gelembung-gelembung tadi terbawa oleh aliran dan bila mencapai suatu titik yang bertekanan lebih tinggi maka maka dengan segera gelembung-gelembung uap tadi akan uap tadi akan hancur sebab uap tersebut terkondensasi menjadi cairan lagi. Kemudian cairan yang ada disekeliling rongga yang terbentuk cepat sekali mengisi rongga tersebut. Cairan tersebut yang berpindah dari segala arah tersebut bertumbukan tepat ditengah-tengah rongga, daengan adanya tumbukan ini terjadilah kenaikan tekanan lokal yang sangat tinggi (dapat mencapai 1 GPa).

Permukaaan benda padat yang ada disekitarnya juga terkena tekanan yang sangat kuat ini, walaupun rongga-rongga tersebut tidak tepat bersinggungan dengan permukaan pada suatu benda padat tersebut, hal tersebut dikarenakan tekanan dipropagasikan dari rongga-rongga tersebut oleh gelombang tekanan yang serupa dengan yang ditemui pada water hammer. Kejadian pembentukan dan hancurnya gelembung-gelembung uap yang bergantian tersebut berulang-ulang dengan frekuensi sampai beberapa ribu kali dalam satu detik. Tekanan lokal yang sangat kuat tersebut walaupun hanya beraksi dalam waktu yang sangat singkat dan pada daerah yang sangat sempit, dapat menyebabkan kerusakan serius terhadap permukaan benda padat tersebut (sebagai contoh punggung dari pada sudu runner turbin air). Material tersebut rusak karena adanya kelelahan (fatigue), korosi dan permukaan menjadi sangat jelek dan berlubang-lubang kecil. Kavitasi juga terjadi pada aliran biasaanya diikuti dengan getaran dan kebisingan, dengan demikian apabila kavitasi terjadi turbin air atau pompa maka suara bising timbul dalam mesin tersebut.

Kavitasi bukan hanya merusak bagian-bagian mesin fluida seperti disebutkan diatas akan tetapi juga menurunkan efisiensi dari mesin tersebut karena gelembung-gelembung yang terbentuk bila berukuran besar dapat mengganggu aliran fluida. Umtuk itulah setiap usaha yang dapat mengeleminasi terjadinya kavitasi dalam mesin fluida sebaiknya diakukan, hal tersebut yakni, untuk menjamin bahwa setiap titik cairan yang mengalir dalam mesin bertekanan diatas tekanan penguapannya. Apabila didalam cairan tersebut terdapat udara yang membentuk suatu campuran dengan cairan tersebut maka udara tersebut akan dibebaskan pada saat tekanan campuran tersebut turun dan dengan demikian akan terjadilah kavitasi udara. Walaupun kavitasi udara memiliki bahaya yang lebih sedikit dibandingkan kavitasi uap terhadap permukaan benda padat, akan tetapi kavitasi udara memiliki efek yang serupa terhadap efisiensi dari mesin fluida.

Kalau kavitasi berawal pada saat tekanan mencapai suatu harga yang sangat rendah, hal tersebut terjadi pada titik-titik dimana kecepatan atau elevasi yang tinggi, dan khususnya pada mesin fluida (sebagai contoh turbin air) yang memiliki kecepatan tinggi dan dipasang pada tempat yang berelevasi tinggi (dalam permukaan laut).

Untuk turbin air reaksi titik tekanan minimum tersebut biasaanya pada ujung bagian keluar dari runner, pada sisi depan. Untuk aliran antara suatu titik yang demikian dan akhir bagian sisi buang kedalam permukaan air bawah atau *tail race* (dimana *head* total adalah tekanan atmosfer) maka persamaan energinya dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{p_{min}}{g\rho} + \frac{v^2}{2g} + z - h_f = \frac{p_{atm}}{g\rho}$$
 (Daugherty, 1986: 87)

dimana:

p<sub>min</sub>: tekanan terkecil pada titik yang ditunjuk (misal suatu titik pada ujung bagian keluar sudu-sudu gerak), tekanan absolut.

 $\rho$ : rapat masa cairan

h<sub>f</sub> : jarak antara titik yang ditunjuk tersebut (bertekanan minimum)
 dan akhir bagian sisi buang kedalam permukaan air bagian sisi
 buang kedalam permukaan air bawah atau tail race.

v : kecepatan cairan pada suatu titik yang ditunjuk dimana pada saat tekanan terkecil,

p<sub>atm</sub>: tekanan udara luar.

z : jarak antara titik yang ditunjuk dengan tinggi air permukaandi *tail race*.

Persamaan tersebut diatas lebih jauh menunjukkan mengapa kecepatan air kecepatan air keluar *runner* harus sekecil mungkin, semakin besar harga V semakin kecil harga p<sub>min</sub> dan hal yang demikian memungkinkan terjadinya kavitasi. Penyusunan kembali persamaan tersebut diatas kita dapatkan persaman:

$$\frac{v^2}{2g} - h_f = \frac{p_{atm}}{\rho g} - \frac{p_{min}}{\rho g} - Z$$
 (Daugherty, 1986: 87)

Untuk suatu desain khusus mesin yang dioperasikan dibawah kondisi desainnya, bagian kiri dari persamaan tersebut dipertimbangkan sebagai suatu proporsi khusus, biasaanya disebut angka Thoma ( $\sigma$ ), dalam *head* bersih (H) untuk mesin tersebut. Dengan demikian:

$$\sigma = \frac{\frac{p_{atm} - p_{min}}{\rho g} - z}{H}$$
 (Daugherty,1986: 494) (2-3)

Agar kavitasi tidak terjadi  $p_{min}$  harus lebih besar daripada tekanan penguapan cairan  $p_v$ . Dengan demikian, dimana:

$$\sigma_c = \frac{\frac{p_{atm} - p_v}{\rho g} - z}{H}$$
 (Daugherty,1986: 493)(2-4)

dimana:

 $\sigma_c$ : *Thoma* kritis

 $p_{atm}$ : tekanan atmosfer (Pa)

 $p_{\nu}$ : tekanan penguapan fluida kerja (Pa)

 $\rho$  : rapat masa air (1000 kg/m<sup>3</sup>)

g : percepatan gravitasi (9,8 m/s<sup>2</sup>)

H : tinggi tekan pada turbin (m)

Persamaan untuk angka thoma kritis sebuah turbin air bisa ditunjukkan seperti pada persamaan berikut ini:

$$\sigma_{c} = \frac{\frac{p_{atm}}{\rho g} \frac{p_{v}}{\rho g} - z}{H}$$
 (Daugherty,1986: 493) (2-5)

Agar tidak terjadi kavitasi maka nilai  $\sigma$  harus lebih kecil daripada nilai  $\sigma_{crit}$  ( $\sigma$ <  $\sigma_{crit}$ ). Dari keadaan tersebut maka dapat diketahui besarnya tingkat kavitasi, yaitu:

$$tingkat\ kavitasi = \frac{\sigma}{\sigma_c}$$
 (Dietzel, 1996: 42) (2-6)

Dimana:

 $\sigma_c$ : thoma kritis

 $\sigma$ : thoma aktual

Dari rumus diatas jika didapatkan nilai  $\geq 1$  maka dapat dipastikan dalam turbin tersebut terjadi kavitasi dan sebaliknya, jika didapatkan nilai < 1 maka pada turbin tersebut tidak terjadi kavitasi.

Persamaan diatas dikenal sebagai parameter kavitasi Thoma, diambil dari nama insinyur Jerman bernama Dietrich Thoma (1881-1943), yang mana beliau orang pertama yang menganjurkan pemakaian rumus tersebut

#### 2.4 Head

Head adalah energi yang dimiliki fluida mengalir tiap satuan berat aliran. Dalam sebuah operasi turbin air nilai head sangatlah penting karena head berpengaruh

pada performa turbin air tersebut. Pada sebuah turbin air head dikelompokkan sebagai berikut:

- 1. Gross head, adalah head yang diperoleh dari perbedaan ketinggian air waduk sebelum memasuki turbin dengan ketinggian air yang keluar dari draft tube (air pada *tail race*)
- 2. Static head, adalah head yang diperoleh dengan mengurangi gross head dengan losses yang terjadi pada saluran sebelum masuk guide vane.
- 3. Effective head, adalah head yang diperoleh dari gross head yang telah dikurangi semua losess yang dialami aliran. Losses ini dimulai dari awal masuk turbin dengan sisi keluaran turbin (draft tube)

#### 2.5 Persamaan Bernoulli

Dalam mendapatkan persamaan Bernoulli terdapat asumsi-asumsi yang harus diperhatikan yaitu alirannya tidak mengalamai perubahan kecepatan (steady), tanpa gesekan antara fluida dengan permukaan saluran atau pipa, tak mampu mampat (incompressible) dan massa jenis fluida (ρ) konstan.

Untuk fluida ideal persamaas Bernoulli adalah sebagai berikut:

$$H = Z + \frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{V^2}{2 \cdot g} = \text{konstan}$$
 (Streeter. & Wylie, 1996:4) (2-7)

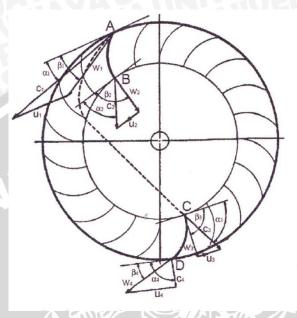
Persamaan Bernoulli untuk fluida real menggambarkan kesetimbangan energi seperti halnya hukum energi mekanik, tetapi mengikutsertakan kerugian-kerugian energi yang terjadi di dalam persamaan tersebut.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{Vm_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2^2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{Vm_2^2}{\rho g} + \sum h$$
 (Nekrasov. 1990: 59)

Pada fluida real total energi yang dimiliki fluida tidak konstan, karena ada kehilangan energi selama fluida mengalir. Untuk aliran fluida real di dalam pipa ada beberapa hal yang harus diperhatikan, yaitu fluida memiliki viskositas yang menyebabkan distribusi kecepatan pada penampang melintang saluran tidak seragam dan mengakibatkan kehilangan energi (head losses). Ketika fluida berviskositas mengalir di dalam pipa, aliran diperlambat oleh gaya viskositas dan adhesi antara molekul fluida dan dinding pipa.

#### 2.6 Segitiga Kecepatan

Pada mesin berputar biasaanya menggunakan segitiga kecepatan untuk menghitung performa dasar dari sebuah turbin air. Setiap aliran fluida pada titik tinjau pada turbin mempunyai segitiga kecepatan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.16 dibawah ini:



Gambar 2.16: segitiga kecepatan Sumber: Dietzel, 1996: 11

Dalam segitiga kecepatan ada tiga buah vektor kecepatan , seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.16. vektor vektor kecepatan yang pertama adalah kecepatan tangensial yaitu kecepatan keliling rotor ( $\bar{u}$ ). Kedua ialah vektor kecepatan aliran air atau kecepatan absolute ( $\bar{c}$ ) dan yang ketiga adalah kecepatan relatif air terhadap sudu atau yang disebut dengan kecepatan relatif ( $\overline{w}$ ). Secara rumus dapat ditulis sebagai berikut:

$$\bar{c} = \bar{u} + \bar{w} \qquad (Dietzel, 1996: 11) \quad (2-9)$$

Dimana:

 $\bar{c}$  = kecepatan absolute fluida

 $\bar{u}$  = kecepatan tangensial

 $\overline{w}$  = kecepatan relatif

Pada umumnya tinjauan untuk segitiga kecepatan ada pada sisi masuk dan sisi keluar sudu. Pada sisi masuk, fluida keluar dari nozzle dengan keceapatan  $c_1$ , runner akan berputar dengan kecepatan tangensial  $u_1$ . Relatif terhadap rotor kecepatan fluida masuk runner sebesar  $w_1$ . Aliran fluida setelah melewati sudu akan mempunyai

kecepatan keluar relatif terhadap rotor  $w_2$  dan kecepatan tangensial  $u_2$  sehingga kecepatan absolut  $c_2$ .

#### 2.7 Tekanan Penguapan

Zat-zat cair seperti air dan bensin yang menguap apabila ditempatkan dalam suatu bejana yang terpapar ke udara adalah hal yang normal. Penguapan terjadi karena beberapa molekul cairan di permukaan mempunyai cukup momentum untuk mengatasi gaya kohesi antar molekul dan melepaskan diri ke atmosfer. Jika bejana ditutup dengan sedikit ruang berisi udara di atas permukaannya, dan ruangan ini kemudian divakumkan, maka akan terbentuk sebuah tekanan di dalam ruang ini akibat dari uap yang terbentuk oleh molekul-molekul yang melepaskan diri. Ketika suatu kondisi kesetimbangan tercapai sedemikian hingga jumlah molekul yang meninggalkan permukaan sama dengan jumlahnya yang masuk, uap tersebut dikatakan telah jenuh dan tekanan yang diberikan oleh uap pada permukaan zat cair disebut sebagai tekanan uap.

Tekanan penguapan merupakan tekanan dimana sebuah zat dengan suhu tertenu mulai meguap. Tekanan penguapan merupakan fungsi dari temperatur yang artinya tekanan penguapan meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur. Besarnya tekanan penguapan dipengaruhi oleh jenis zat dan temperatur dari zat tersebut. Sebagai contoh, tekanan penguapan air pada suhu 15°C adalah sebesar 1.706 kPa misalnya pada keadaan suhu tersebut tekanan penguapannya turun kurang dari 1.706 kPa maka air tersebut akan menguap.

Alasan penting kita meninjau tekanan uap adalah karena dari pengamatan umum bahwa di dalam fluida yang sedang mengalir, bisa jadi akan terbentuk tekanan yang sangat rendah karena gerakan fluida, dan jika tekanan menjadi rendah sampai mencapai tekanan uapnya, pendidihan akan terjadi. Misalnya, fenomena ini mungkin terjadi pada aliran yang melalui lintasan yang tidak menentu, mengecil pada sebuah katup atau pompa. Apabila gelembung-gelembung uap terbentuk di dalam fluida yang mengalir, gelembung-gelembung tersebut akan terseret ke dalam daerah yang bertekanan lebih tinggi di mana gelembung-gelembung tersebut akan pecah dengan intensitas yang cukup untuk mengakibatkan kerusakan struktur. Pembentukan yang dilanjuti dengan pecahnya gelembung uap di dalam fluida mengalir yang disebut kavitasi ini merupakan fenomena aliran fluida yang sangat penting. Pada penelitian ini

BRAWIJAYA

zat yang digunakan adalah air, pada tabel 2.1 berikut ini adalah tabel tekanan penguapan air pada suhu yang berbeda:

Tabel 2.1: Tekanan penguapan air

suhu (°C)	P (kPa)	P (mHg)	P (mH <sub>2</sub> O)
1	0.657	0.005	0.067
3	0.758	0.006	0.078
5	0.873	0.007	0.090
0.57	1.002	0.008	0.103
9	1.148	0.009	0.118
11	1.313	0.010	0.135
13	1.498	0.011	0.154
15	1.706	0.013	0.175
17	1.938	0.015	0.199
19	2.198	0.017	0.226
21	2.488	0.019	0.255
23	2.811	0.021	0.289
25	3.170	0.024	0.325
27	3.568	0.027	0.366

Sumber: Daugherty, 1986:523

## 2.8 Hipotesis

Semakin besar nilai bukaan *guide vane* pada sebuah turbin Francis dengan *head* yang tetap akan membuat tekanan pada sisi keluar *runner* akan semakin rendah dan mengakibatkan bilangan *thoma* yang dihasilkan akan semakin tinggi sehingga tingkat kavitasi yang terjadi akan meningkat.