LAPORAN PENELITIAN

PENGARUH GEOMETRI SUDU TERHADAP KINERJA TURBIN AIR DARRIEUS UNTUK ALIRAN SUNGAI

Oleh :

Ketua : Prof. Dr. Ir. Kaprawi,DEA

Anggota : 1. Ir. Firmansyah B.,MT
2. Barlin, ST,MT
3. Aneka Firdaus,ST,MT
4. Ir. Dyos Santoso,MT
5. Astuti, ST,MT

JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2011

HALAMAN PENGESAHAN

1. Judul Penelitian : Pengaruh geometri sudu terhadap kinerja turbin air Darrieus untuk aliran sungai

2. Peneliti Utama
   a. Nama Lengkap : Prof. Dr. Ir. Kaprawi,DEA
   b. Jenis Kelamin : L
   c. NIP : 195701181985031004
   d. Pangkat /Golongan : Pembina / IV-b
   e. Jabatan Struktural : -
   f. Jabatan fungsional : Guru Besar
   g. Jurusan : Teknik / Teknik Mesin
   h. Alamat : Jl. Raya Palembang-Prabumulih km. 32 Inderalaya
   i. Telpon/Faks : 085273962107
   j. Alamat Rumah : Jl. Putri Kembang Dadar no. 53 Rt. 52 Bukit lama, Palembang
   k. Telpon/Faks : 0711-580272
   l. E-mail : kaprawis@yahoo.com

3. Jangka Waktu Penelitian : 6 bulan
4. Jenis Penelitian : Unggulan
5. Biaya penelitian : Rp 20.000.000,-
6. Sumber Dana : DIPA Fakultas Teknik UNSRI T.A 2011

Menyetujui,
Ketua UPPM Fakultas Teknik,

Dr. Hj. Tuti Emilia A., ST,MT
NIP.197208092000002001

Inderalaya, Okt. 2011
Ketua Peneliti,

Prof. Dr. Ir. Kaprawi S.,DEA
NIP.195701181985031004

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik Unsri,

Prof. Dr. Ir. H.M Taufik Toha,DEA
NIP.195308141985031002

Seminar Nasional
***Added Value of Energy Resources* (AVoER) 2011**
Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya
Kampus Bukit Besar Palembang
Telp. : 0711 370178 Fax. : 0711 352870
e-mail : avoer_committee@unsri.ac.id
Website: http://avoer.unsri.ac.id

21 September 2011

No. : 306/U/AVoER/FT/2011
Lampiran : 1 lembar form penulisan makalah lengkap
1 lembar form konfirmasi kehadiran
Hal : Pemberitahuan dan undangan seminar
Kepada :

Yth. Bpk/Ibu Prof. Dr. Ir. H. Kaprawi Sahim, DEA
Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya

Dengan hormat,
Kami panitia "**Seminar Nasional AVoER 2011**", berdasarkan rekomendasi dari tim reviewer, menyatakan bahwa makalah Bapak/Ibu dengan judul:

"PENGARUH GEOMETRI SUDU DARI TURBIN AIR DARRIEUS TERHADAP KINERJANYA"

Diterima untuk disajikan pada seminar tersebut. Perlu kami ingatkan bahwa makalah lengkap harus kami terima paling lambat tanggal 21 Oktober 2011 dalam bentuk softcopy (file word document dengan nama sesuai nomor surat ini), dan bukti transfer pembayaran pendaftaran kami terima paling lambat tanggal 23 Oktober 2011. Apabila lewat dari tanggal tersebut, maka makalah tersebut tidak masuk dalam proceeding. Format penulisan makalah lengkap, biaya serta formulir registrasi selengkapnya dapat dilihat pada website http://avoer2011.unsri.ac.id.

Selanjutnya panitia mengundang Bapak/Ibu pada:
Hari/Tanggal : Rabu – Kamis, 26 - 27 Oktober 2011
Pukul : 08.00 wib s.d. selesai
Tempat : Aula Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya,
Kampus Bukit Besar
Jl. Srijaya Negara Palembang

Atas perhatian dan kehadiran Bapak/Ibu diucapkan terima kasih.

Hormat kami,
Ketua Panitia Pelaksana

SEMINAR NASIONAL AVoER

Dr. Ir. Diah Kusuma Pratiwi, MT
NIP. 19630719 199003 2 001

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN ii

DAFTAR ISI iii

KATA PENGANTAR iv

ABSTRAK v

BAB 1. PENDAHULUAN 1

BAB 2. PERUMUSAN MASALAH 2

- 2.1 Latar Belakang 2
- 2.2 Permasalahan 3
- 2.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian 3

BAB 3. TINJAUAN PUSTAKA 5

- 3.1 Kincir Air 12
- 3.2 Turbin Air 16
  - 3.2.1 Turbin Darrieus 16
  - 3.2.2 Hydrofoil 18
  - 3.2.3 Daya Air dan Turbin 22

BAB 4. METODE PENELITIAN 27

- 4.1 Sistem Aliran air 27
- 4.2 Rotor Turbin Darrieus 28
- 4.3 Sudu Turbin 29
- 4.4 Prosedur Pengujian 31

BAB 5. HASIL DAN PEMBAHASAN 33

- 5.1 Hasil Pengukuran dan pengolahan 33
- 5.2 Pembahasan 38

BAB 6. KESIMPULAN 44

DAFTAR PUSTAKA 45

LAMPIRAN 47

1. Personalia Penelitian 47
2. Riwayat Hidup Ketua Peneliti 48
3. Uraian Biaya Penelitian 50
4. Foto Sudu Turbin 51
5. Foto Pelaksanaan Pengukuran 53
6. Video Pelaksanaan Penelitian 57

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami haturkan kehadirat Allah SWT karena kami telah dapat menyelesaikan kegiatan penelitian tentang turbin air jenis Darrieus di daerah Lubuk Linggau yaitu di saluran irigasi dam sungai kelingi (watervang). Pelaksanaan telah oleh tim dibantu oleh beberapa orang mahasiswa Teknik Mesin. Selain itu yang paling utama penelitian ini telah difasilitasi oleh Fakultas Teknik melalui pengucuran dana penelitian FT Unsri. Oleh karena itu kami mengucapkan kepada dekan FT UNSRI yang telah bekerjasama dalam memfasilitasi penelitian ini selain itu pula kami berterima kasih kepada mahsiswa-mahsiswa yang telah membantu melaksanakan pengukuran dalam penelitian ini. Begitu juga kami berterima kasih kepada Pembantu Dkan I dan II FT UNSRI dan staf administrasi Unit Penelitian dan Pengabdian FT serta pihak lainnya yang telah membantu sehingga terlaksananya penelitian ini dengan lancar. Akhir kata semoga laporan dan hasil penelitian ini bermanfaat bagi kita semua.

ABSTRAK

Indonesia mengalami permintaan akan arus listrik yang semakin naik dari tahun ke tahun. Oleh karena itu Pemerintah dalam hal ini PLN mengalami masalah dalam pengadaan energi listrik sehingga sering terjadi pemadaman bergilir didalam masyarakat. Hal ini terjadi di perkotaan maupun di desa yang sudah teraliri listrik yang mengakibatkan kehidupan ekonomi masyarakat sangat terganggu. Penelitian-penelitian telah banyak dilakukan untuk mencari berbagai solusi akan hal tersebut mulai dari mencari sumber energi baru dan terbarukan, mengintensifkan pencarian sumber alam energi, alternatif energi sampai kepada metode pemanfaatan energi yang tersedia di alam yang kadang-kadang disebut teknologi energi. Dalam laporan ini penulis telah mempelajari pengaruh geometri sudu turbin terhadap kinerjanya. Geometri dalam hal ini adalah sudu simetris dengan ketebalan yang bervariasi dan sudu tak-simetris dengan posisi pemasangan pada dua konfigrasi yaitu bagian lengkung menghadap kedalam dan bagian lengkung menghadap keluar. Dari hasil studi eksperimental yang telah dilakukan pada saluran irigasi sistem dam sungai kelingi (Watervang) di Lubuk Linggau. Hal ini dilakukan oleh karena pada sistem bendungan ini mendapatkan kecepatan aliran yang konstan sehingga hasil penelitian lebih akurat. Hasil menunjukkan bahwa sudu yang mempunyai efisiensi lebih tinggi adalah dengan ketebalan 15% dan 20% dari lebah sudu (*chord*). Selain itu mempunyai range operasi *tip speed ratio* yang lebih besar. Untuk sudu tak-simetris, hasil menunjukkan bahwa kondisi pemasangan sudu dimana bagian lengkung dari susu dipasang menghadapap keluar dari poros karena mempunyai efisiensi yang lebih besar dan range operasi lebih besar pula.

BAB 1
PENDAHULUAN

Potensi energi di Sumatera Selatan sangat banyak diantaranya adalah energi berasal dari minyak bumi, gas, geothermal, selain itu energi berkelanjutan seperti energi matahari, angin dan air yang sangat banyak. Khusus energi potensial air berupa air terjun dan aliran sungai, potensi sumber energy ini sangat banyak mengingat Sumatera Selatan dikelilingi oleh pegunungan yang menghasilkan aliran. Energi potensial dari air dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan diantaranya bisa sebagai wisata air terjun dan sebagai penggerak generator listrik untuk rumah tangga.

Di Sumatera Selatan banyak sekali sungai-sungai baik yang kecil maupun yang besar dan dari sungai-sungai ini banyak dijumpai sungai-sungai kecil di pedesaan yang mana lebar sungai dan kecepatan air sangat bevariasi. Untuk di daerah perbukitan pada umumnya sungai-sungainya kecil dan kecepatan alirannya cukup tinggi. Melihat potensi yang sangat banyak akan sungai di Sumsel maka perlu dikaji suatu model turbin air sungai yang dapat memanfaatkan aliran air sungai sebagi penggerak turbin.

Penelitian ini dilakukan dalam skala lapangan yang mana untuk hal ini dengan membuat sebuah turbin kecil karena turbin dengan mudah dipasang di salah satu sungai yang ada di Sumatera Selatan. Tujuan dari kedua hal ini untuk mendapatkan efisiensi yang aktual dari suatu turbin Darrieus dan batasan-batasan pemakiannya karena untuk menghasilkan daya yang besar hanya cukup membuat turbin yang berukuran besar. Dalam laporan ini penelitian telah dilakukan di lapangan yaitu di saluran irigasi air keluar dari pintu air di Lubuk Linggau yaitu di dam sungai kelingi ke saluran irigasi (watervang). Karena melihat kondisi dam dan air, kecepatan pada saluran keluar dari pintu air adalah konstan.

Hasil penelitian yang telah menggunakan beberapa jenis sudu baik sudu simetris maupun sudu tak-simetris menunjukkan bahwa sudu simetris mempunyai kinerja yang lebih baik. Sudu simetris dengan tebal 15% s.d 20% yang dinyatkan dengan standard hydrofoil NACA 0015 dan NACA 0020 mempunyai efisiensi yang paling baik dan mempunyai *tip speed ratio* (λ) yang lebih tinggi. Untuk sudu tak-simetris dengan standard NACA 4424 maka pemasangan sudu dengan bagian lengkung terletak di bagian luar mempunyai efisiensi dan λ yang lebih besar.

BAB 2
PERUMUSAN MASALAH

2.1 Latar Belakang

Turbin air dimanfaatkan untuk mengkonversi energi potensial aliran air ke energi mekanik yang seterusnya dikonversikan ke energi listrik yang bermanfaat untuk masyarakat. Berbagai jenis turbin air yang telah digunakan khusunya untuk skala besar sebagai pembangkit listrik yang mana pada umumnya mempunyai potensi energi potensial air yang besar. Potensi energi air ini yang paling besar adalah adanya air terjun atau adanya beda head potensial dari air dan dengan debit yang besar. Pada air terjun yang tinggi kebanyakan digunakan turbin jenis impuls seperti turbin Pelton, Banki atau dapat juga digunakan turbin reaksi jenis Francis. Untuk debit yang sangat besar dan head yang rendah sering digunakan turbin jenis Kaplan karena turbin ini lebih cocok dengan debit air yang sangat besar.

Pemakaian jenis turbin tergantung dengan beberapa faktor selain karakteristik aliran potensial air tersebut, dapat juga dipengaruhi oleh keandalan, kemudahan dalam pembuatan, operasinya dan material dari material turbin yang berhubungan dengan kualitas aliran air. Sebagai contoh pada head yang sama maka dapat digunakan turbin Pelton dan tubin Banki, oleh karena alasan kemudahan dalam pembuatan maka lebih baik digunakan turbin Banki. Turbin Banki sangat mudah untuk dibuat dibandingkan dengan turbin Pelton yang mempunyai bentuk bucket tertentu.

Potensi air terjun di Sumatera Selatan tidak banyak dimanfaatkan untuk pembangkit listrik skala mikrohidro karena berbagai alasan yang mana diantaranya karena air terjun jauh dari desa, desa sudah teraliri listrik dan air terjun dijadikan lokasi wisata masyarakat. Kalau dilihat lebih jauh tentang potensi air sebagai pembangkit energi adalah aliran air sungai, aliran air dari saluran irigasi dan aliran air pasang surut. Melihat potensi ini maka perlu dikaji akan hal tersebut oleh karena kapasitas aliran pada sungai mulai dari kapasitas kecil sampai kapasitas besar dan dapat dimanfaatkan sesuai dengan kebutuhan masyarakat sekitar. Khususnya aliran air sungai dapat dibuat dengan skala besar sistem pembangkit listrik tenaga air. Jumlah aliran air sungai di Sumatera Selatan sesungguhnya sangat banyak untuk dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik desa.

2.2 Permasalahan

Ditinjau dari sisi mesin konversi dalam hal ini turbin air yang dapat digunakan pada aliran air sungai ada beberap jenis yang sepuluh tahun terakhir berkembang seperti turbin heliks (turbin Gorlov) dan turbin Darrieus. Turbin ini dikembangkan juga sebagai turbin angin (kincir angin) karena prinsip kerja adalah sama. Sehubungan dengan kedua jenis turbin tersebut maka turbin Darrieus lebih praktis untuk dibuat dibandingkan dengan turbin Gorlov. Masyarakat akan jauh lebih mudah membuat turbin Darrieus dibanding turbin Gorlov sehingga dapat dibuat oleh masyarakat turbin skala kecil dan sedang (mikroidro). Permasalahan timbul bagaimana untuk meningkatkan efisiensi dari turbin tersebut oleh karena beberapa geometri sudu dapat digunakan untuk turbin tersebut. Geometri sudu pada umumnya adalah yang mengikuti standard NACA. Secara teoritis turbin air untuk aliran sungai mempunyai efisiensi relatif rendah yang mana besarnya sekitar 35% [4]. Efisiensi ini dapat ditingkatkan dengan merubah jumlah sudu, merubah lebar sudu, memakai sudu pengarah dan tergantung dengan jenis sudu yang dipakai. Oleh karena itulah studi ini penulis akan mempelajari pengaruh geometri sudu yang simetris dengan merubah tebal dari sudu dan sudu tidak simetris dengan harapan agar efisiensi turbin dapat ditingkatkan.

2.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Berdasarkan uraian-uraian yang telah diterangkan diatas maka dapatlah dirumuskan tujuan dari rencana penelitian ini sebagai berikut :

A. Tujuan secara umum :

1. Memanfaatkan aliran sungai untuk digunakan sebagai penggerak turbin air yang dapat digunkana untuk menggerakkan generator listrik dan pompa air untuk skala kecil dan menengah.
2. Memberikan gambaran tentang teknologi atau jenis turbin air apa yang cocok untuk dipasang di aliran sungai
3. Dengan skala lapangan maka teknologi tersebut dapat ditawarkan atau disosialisasikan kepada masyarakat untuk dapat digunakan secara luas.

B. Tujuan secara khusus :

1. Mencari geometri sudu turbin Darrieus yang mempunyai efisiensi yang tinggi.
2. Mempelajari pengaruh sudu tak-simetris terhadap torsi yang dihasilkan

3. Mengetahui kinerja turbin Darrieus yang mempunyai hubungan dengan bentuk sudu (geometri sudu) sehingga dapat dipilih dalam perancangan turbin yang tepat.

Dari hasil penelitian secara eksperimental maka manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Dapat memahami operasi, karakteristik dan perkembangan dari turbin Darrieus sehingga hal ini dapat dijadikan sebagai bahan tehnologi untuk pengembangan lebih lanjut dari turbin Darrieus.
2. Dapat mengetahui batsan-batasan pemakaian sudu yang dapat digunakan untuk aplikasi perencanaan turbin dengan kapasitas daya yang besar.
3. Dapat mengetahui geometri yang terbaik dari sudu turbin dan dengan demikian maka hal ini dapat dijadikan sebagai bahan atau data-data didalam perencanaan turbin.

BAB 3
TINJAUAN PUSTAKA

Air merupakan sumber energi yang murah dan relatif mudah didapat untuk di daerah Sumsel. Pada air bila mempunyai ketinggian maka tersimpan energi potensial yang dapat dineentuk air terjun dan air yang mengalir pada sungai mempunyai energi kinetik. Tenaga air (*hydropower*) adalah energi yang diperoleh dari air yang mengalir. Energi yang dimiliki air dimanfaatkan dan digunakan dalam wujud energi mekanis yang seterusnya dirubah ke energi listrik. Pemanfaatan energi air banyak digunakan dengan menggunakan suatu kincir air atau dengan menggunakan turbin air. Sejak awal abad ke 18 kincir air banyak dimanfaatkan sebagai penggerak penggilingan gandum, penggergajian kayu dan mesin tekstil. Pada abad 19 turbin air mulai dikembangkan dan digunakan secara luas untuk tenaga industri sebelum adanya jaringan listrik dan sekarang turbin air digunakan untuk pembangkit tenaga listrik.

3.1 Kincir Air

Kincir air merupakan perintis terciptanya turbin air. Perbedaan utama antara kincir air dan turbin air adalah bahwa kincir air hanya mengubah kecepatan aliran, sedangkan turbin air mengubah arah dan kecepatan aliran. Kincir air dapat didefinisikan sebagai peralatan makanis berbentuk roda (*wheel*), dengan sudu (= *bucket* atau *vane*) pada sekeliling tepi-tepinya, yang diletakkan pada poros horizontal. Kincir air merupakan sarana untuk mengubah energi air menjadi energi mekanik berupa torsi pada poros kincir.

Kincir air memanfaatkan selisih ketinggian alamiah dari permukaan sungai kecil. Air yang masuk ke dalam dan keluar kincir tidak mempunyai tekanan lebih (*over pressure*), hanya tekanan atmosfir saja. Air itu menerjang sudu, yang kebanyakan langsung dihubungkan dengan sebuah mesin.

Pada saat sekarang, penggunaan turbin air lebih banyak jika dibandingkan dengan kincir air. Hal ini disebabkan karena turbin air memiliki keuntungan-keuntungan bila dibandingkan dengan kincir air antara lain:

1) Mempunyai efisiensi yang lebih baik
2) Mampu membangkitkan daya yang lebih besar
3) Mampu memanfaatkan beda ketinggian permukaan air dari yang sangat rendah sampai yang paling tinggi

4) Dapat bekerja terendam di dalam air

5) Dapat beroperasi dengan kecepatan lebih tinggi

Tetapi walaupun begitu, penggunaan kincir air sampai sekarang masih tetap ada, karena mempunyai kelebihan juga dibandingkan dengan turbin air, yaitu konstruksinya yang sederhana dan murah serta mudah dan murah dalam perawatannya. Untuk kegunaan penggilingan, pengairan serta plant kecil sejenis lainnya, dimana penggunaan turbin dinilai terlalu mahal. Walaupun memiliki banyak kekurangan dibandingkan turbin air, teknologi yang sangat sederhana ini cocok digunakan di daerah pedesaan yang terpencil, asalkan daerah tersebut mempunyai potensi sumber tenaga air yang cukup terjamin.

Data sejarah menunjukkan bahwa prinsip konversi energi air menjadi energi mekanik telah dikenal sejak lebih 2.500 tahun yang lalu dengan mulai digunakannya kincir air sederhana yang terbuat dari kayu, sebagai mesin pembangkit tenaga. Penggunaan kincir air diawali dari India, kemudian berkembang ke Mesir, dan berlanjut ke Eropa dan seterusnya merambah ke Amerika.rancangan sistimatik dri kincir air dimulai abad ke 18, dimana banyak dilakukan riset untuk meningkatkan kinerja dari kincir air yang telah dibangun, yang akhirnya menuju ke konstruksi turbin air. Kincir air yang dirancang secara teoritik, dikembangkan oleh Poncelet dan banyak digunakan di Inggris pada awal abad 19.

Jenis-Jenis Kincir Air

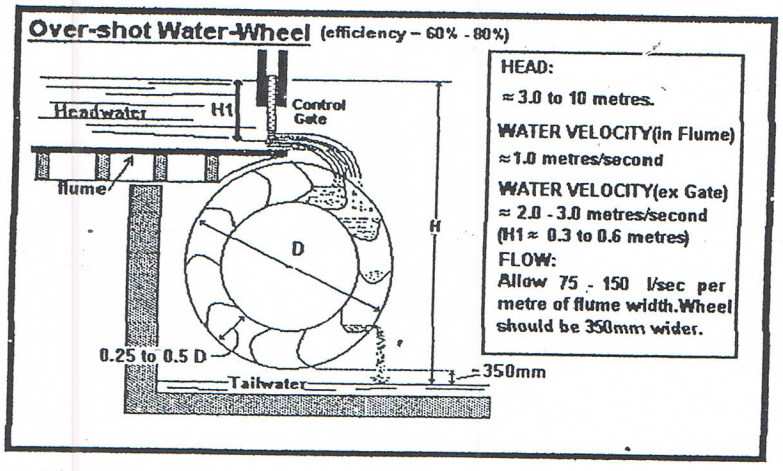
Ada beberapa jenis kincir air berdasarkan sistem aliran airnya, yaitu:

1. Kincir air *overshot*
2. Kincir air *undershot*
3. Kincir air *breastshot*
4. Kincir air *tub*

Pada kincir air jenis *overshot* (Gbr. 3.1), air melalui bagian atas kincir dan kincir terletak di bawah aliran air. Kincir air *overshot* bekerja bila air yang mengalir jatuh ke dalam sudu-sudu sisi bagian atas, seperti terlihat pada gambar dibawah.

Kincir air jenis ini murni memanfaatkan gaya berat air untuk beroperasi. Kincir air tipe *overshot* adalah kincir air yang paling banyak digunakan jika dibandingkan dengan jenis kincir air yang lain, karena memiliki efisiensi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan kincir air tipe yang lain. Rancangan kincir yang menghasilkan kinerja yang baik antara lain dengan mengatur sudu gerak sehingga energi maksimum dari air dapat dimanfaatkan secara optimal. Kadang-kadang posisi kincir diatur agak ke bawah agar

pancaran air juga dapat dimanfaatkan. Pada kondisi ini, roda kincir digerakkan oleh gaya berat air dan dorongan air.



Gambar 3.1 Karakteristik kincir air jenis *overshot*

Air dari permukaan atas masuk ke sudu gerak melalui pintu air (*sluice gate*) yang dapat diatur bukaannya. Besar kecilnya bukaan pintu air ini untuk mengatur putaran kincir air sesuai dengan yang diinginkan.

Keuntungan dari kincir air *overshot*, yaitu:

1. Tingkat efisiensi yang tinggi dapat mencapai 85%.
2. Tidak membutuhkan aliran yang deras.
3. Konstruksi yang sederhana.
4. Mudah dalam perawatan.
5. Teknologi yang sederhana mudah diterapkan di daerah yang terisolir.

Kerugian dari kincir air *overshot*, yaitu:

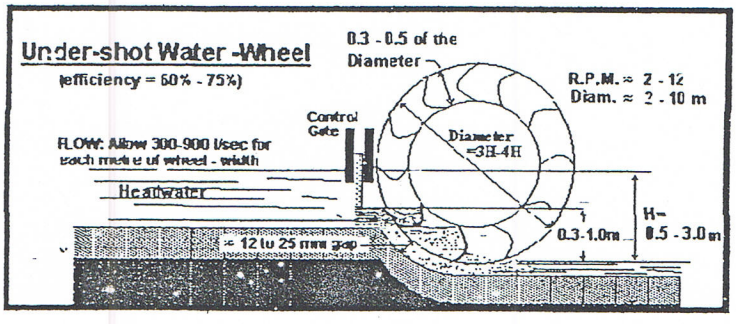
1. Karena aliran air berasal dari atas maka biasanya diperlukan reservoir air atau bendungan air, sehingga memerlukan investasi yang lebih banyak.
2. Tidak dapat diterapkan untuk mesin putaran tinggi.
3. Membutuhkan ruang yang lebih luas untuk penempatan.
4. Daya yang dihasilkan relatif kecil.

Data empirik dari kincir air jenis *overshot* dengan rancangan yang baik, seperti pada Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1 : Data Kincir Air Jenis *Overshot Wheel*

Beda ketinggian permukaan air, Δz(m)	:	10 s.d 25
Diameter nominal kincir, D(m)	:	3 s.d 20
Jumlah sudu gerak (*bucket*), z_b(unit)	:	8 s.d 10
Putaran kincir, n(rpm)	:	4 s.d 8
Efisiensi total, η(%)	:	60 s.d 80

Pada kincir air tipe *undershot*, posisi kincir air diletakkan agak keatas dan sedikit menyentuh air. Pada kincir air jenis *undershot wheel*, air menumbuk sudu gerak dari kincir pada saat posisi roda kincir berada di bawah atau dasar seperti terlihat pada Gbr. 3.2. Kincir air tipe *undershot wheel* cocok dipasang pada perairan dangkal pada daerah yang rata.



Gambar 3.2 Karakteristik kincir air jenis *undershot*

Keuntungan dari kincir air tipe *undershot*, yaitu:

1. Konstruksi yang sederhana.
2. Lebih ekonomis.
3. Mudah untuk dipindahkan.

Kerugian dari kincir air tipe *undershot*, yaitu:

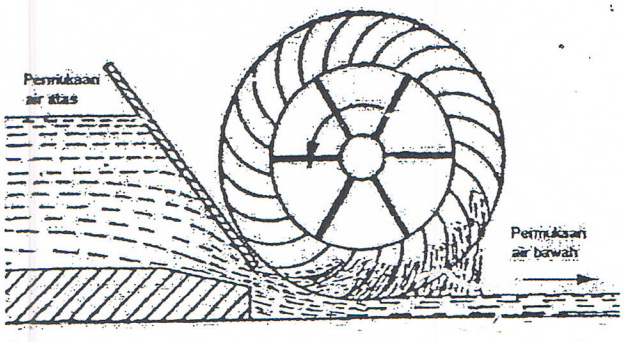
i. Efisiensi kecil.
ii. Daya yang dihasilkan relatif kecil.

Data empirik dari kincir air jenis undershot dengan rancangan yang baik, seperti ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 : Data Kincir Air Jenis *Undershot Wheel*

Beda ketinggian permukaan air, Δz(m)	:	< 5
Diameter nominal kincir, D(m)	:	2 s.d 4H
Putaran kincir, n(rpm)	:	2 s.d 4
Efisiensi total, η(%)	:	35 s.d 45

Sudu gerak kincir air tipe *undershot* sebelum dilakukan modifikasi mempunyai bentuk lurus. Untuk meningkatkan unjuk prestasinya maka bentuk sudu geraknya diubah menjadi bentuk *vane* yang melengkung seperti pada Gbr. 3.3. Jenis kincir air seperti ini dikenal sebagai kincir air *Poncelet*.



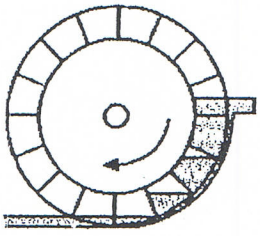
Gambar 3.3 : *Kincir air Poncelet*

Data empirik dari kincir air Poncelet dengan rancangan yang baik, seperti pada tabel 3.3 berikut:

Tabel 3.3 : Data Kincir Air *Poncelet*

Beda ketinggian permukaan air, Δz(m)	:	2 s.d 3
Diameter nominal kincir, D(m)	:	2 s.d 4H
Putaran kincir, n(rpm)	:	2 s.d 5
Efisiensi total, η(%)	:	55 s.d 65

Pada kincir air jenis *breastshot* (Gbr. 3.4), kincir diletakkan sejajar dengan aliran air sehingga air mengalir melalui tengah-tengah kincir air. Kincir air tipe *breastshot* merupakan perpaduan antara tipe *overshot* dan *undershot* dilihat dari energi yang diterimanya. Kincir air jenis ini memperbaiki kinerja dari kincir air tipe *undershot*.



Gambar 2.4 : Kincir air tipe *breastshot*

Beberapa hal khusus dari rancangan kincir air jenis *breastshot wheel* adalah sebagian dari bagian bawah roda kincir terendam atau berada dibawah permukaan air bawah dan diameter dari kincir air tipe *breastshot wheel* lebih besar dari beda ketinggian permukaan air yang ada.

Data empirik kincir air jenis breastshot dengan rancangan yang baik, seperti pada Tabel 3.4 berikut:

Tabel 3.4 : Data Kincir Air Jenis *Breastshot*

Beda ketinggian permukaan air, Δz(m)	:	1 s.d 5
Diameter nominal kincir, D(m)	:	4 s.d 8
Putaran kincir, n(rpm)	:	3 s.d 7
Efisiensi total, η(%)	:	50 s.d 65

Keuntungan dari kincir air *breastshot*, yaitu:

1. Tipe ini lebih efisien dari tipe *undershot*
2. Dibandingkan tipe *overshot* tinggi jatuhnya lebih pendek
3. Dapat diaplikasikan pada sumber air aliran datar

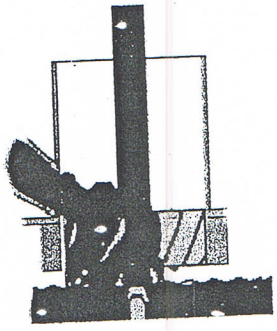
Kerugian kincir air *brestshot*, yaitu:

1. Sudu-sudu dari tipe ini lebih rumit
2. Diperlukan dam pada arus aliran datar
3. Efisiensi lebih kecil dari pada tipe *overshot*

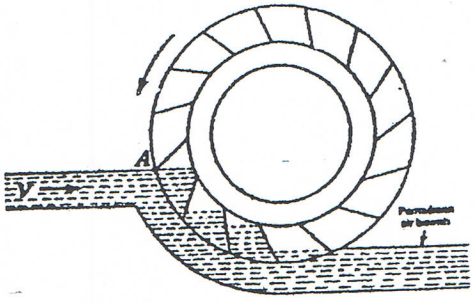
Kincir air *Tub* (Gbr. 3.5) merupakan kincir air yang kincirnya diletakkan secara horizontal dan sudu-sudunya miring terhadap garis vertikal, dan tipe ini dapat dibuat lebih kecil dari pada tipe *overshot* maupun tipe *undershot*. Karena arah gaya dari pancuran air menyamping, maka energi yang diterima oleh kincir yaitu energi potensial dan kinetik.

Selain kincir-kincir yang telah dijelaskan diatas, dikenal juga kincir air Sagebien (Gbr. 3.6) serta kincir air jenis reaksi atau lebih dikenal sebagai Barker's *Mill*. Pada kincir

air Sagebien, pada roda kincir dipasangkan sejumlah plat yang membentuk sudut 30° sampai 40° terhadap radius kincir, serperti tampak pada Gbr. 3.6. Roda kincir dijaga terletak pada aliran sedemikian rupa, sehingga air menumbuk plat searah horizontal.



Gambar 3.5 : Kincir air tipe *Tub*

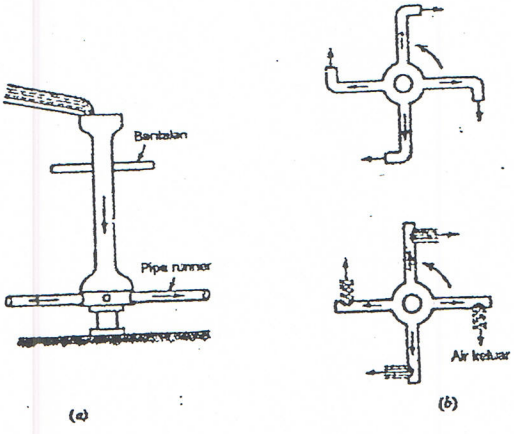


Gambar 3.6 : Kincir air *Sagebien*

Kincir air jenis Barker'*s Mill* (Gbr. 3.7) merupakan kincir air yang gerakan roda kincir disebabkan oleh reaksi dari pancaran air. Pada Barker'*s Mill*, air dimasukkan melalui pipa vertikal di tengah roda kincir, kemudian air didistribusikan ke pipa-pipa *runner*. Saat air keluar memancar dari bukaan di ujung pipa *runner*, timbul gaya reaksi yang membuat *runner* memutar poros.

Ada dua jenis pancaran air dari *runner*, yaitu:

1) Ujung-ujung dari pipa *runner* dibengkokkan 90°
2) Ujung-ujung dari pipa *runner* ditutup, dan pada sisi pipa dekat ujung diberi lubang untuk memancarkan air



Gambar 3.7 : Barker'*s Mill*

3.2 Turbin Air

Turbin air dikembangkan pada abad 19 dan digunakan secara luas untuk pembangkit tenaga listrik. Turbin air mengubah energi potensial air menjadi energi mekanis. Energi mekanis diubah dengan generator listrik menjadi tenaga listrik. Berdasarkan prinsip kerja turbin dalam mengubah energi potensial air menjadi energi mekanis, turbin air dibedakan menjadi dua kelompok yaitu turbin impuls dan turbin reaksi.

Turbin adalah penggerak mula yang merubah energi potensial menjadi energi mekanis pada poros turbin. Berdasarkan prinsip kerjanya, turbin air dibedakan menjadi dua, yaitu:

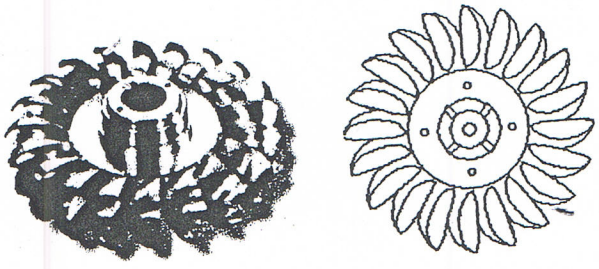
a. Turbin Impuls, yaitu bahwa semua tekanan pada *nozzel* tetap diubah menjadi energi kinetik sebelum pancarannya mengenai sudu-sudu rotor turbin. Turbin impuls disebut juga turbin pancaran bebas. Contoh dari turbin impuls adalah turbin Pelton (Gbr. 3.8)
b. Turbin Reaksi, yaitu bahwa tidak semua energi tekanan fluida diubah menjadi energi kinetik. Fluida masih memiliki energi tekanan maupun kinetik ketika keluar dari turbin, misalnya turbin Francis (Gbr. 3.11) atau Kaplan.

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. Turbin impuls adalah turbin tekanan sama karena aliran air yang keluar dari *nozzle* tekanannya adalah sama dengan tekanan atmosfer sekitarnya. Semua energi tinggi tempat dan tekanan ketika masuk ke sudu jalan turbin dirubah menjadi energi kecepatan.

Turbin pelton merupakan turbin impuls. Turbin Pelton terdiri dari satu set sudu jalan yang diputar oleh pancaran air yang disemprotkan dari satu atau lebih alat yang disebut nosel. Turbin Pelton adalah salah satu dari jenis turbin air yang paling efisien dan cocok digunakan untuk *head* tinggi.

Bentuk sudu turbin terdiri dari dua bagian yang simetris. Sudu dibentuk sedemikian sehingga pancaran air akan mengenai tengah-tengah sudu dan pancaran air tersebut akan berbelok ke kedua arah sehinga bisa membalikkan pancaran air dengan baik dan membebaskan sudu dari gaya-gaya samping. Untuk turbin dengan daya yang besar, sistem

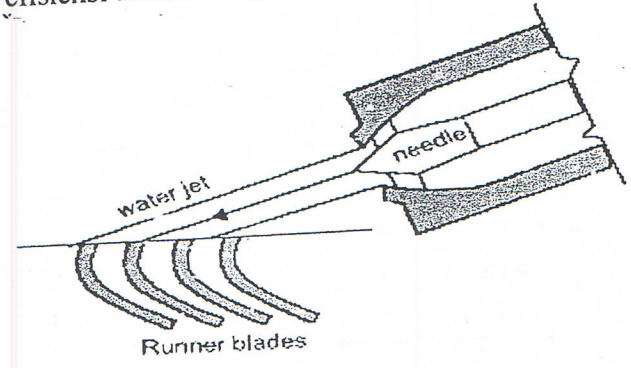
penyemprotan airnya dibagi lewat beberapa *nozzle*. Dengan demikian diameter pancaran air bisa diperkecil dan ember sudu lebih kecil.



Gambar 3.8 : Sudu turbin Pelton

Turbin Pelton untuk pembangkit skala besar membutuhkan *head* lebih kurang 150 meter tetapi untuk skala mikro *head* 20 meter sudah mencukupi.

Turbin Turgo (Gbr. 3.9) dapat beroperasi pada *head* 30 s/d 300 m. Seperti turbin pelton turbin turgo merupakan turbin impuls, tetapi sudunya berbeda. Pancaran air dari *nozzle* membentur sudu pada sudut 20°. Kecepatan putar turbin turgo lebih besar dari turbin Pelton. Akibatnya dimungkinkan transmisi langsung dari turbin ke generator sehingga menaikkan efisiensi total sekaligus menurunkan biaya perawatan.

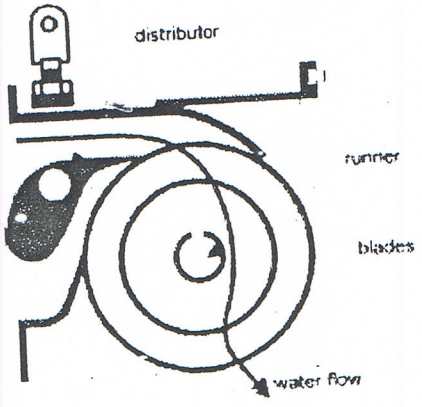


Gambar 2.9 : Sudu turbin Turgo dan *nozzle*

Salah satu jenis turbin impuls ini juga dikenal dengan nama turbin Michell-Banki (Gbr. 3.10) yang merupakan penemunya. Selain itu juga disebut Turbin Osberger yang merupakan perusahaan yang memproduksi turbin *crossflow*. Turbin *crossflow* dapat dioperasikan pada debit 20 l/s hingga 10 m^3/s dan *head* antara 1 s/d 200 m.

Turbin *crossflow* menggunakan *nozzle* persegi panjang yang lebarnya sesuai dengan lebar *runner*. Pancaran air masuk turbin dan mengenai sudu sehingga terjadi konversi

energi kinetik menjadi energi mekanis. Air mengalir keluar membentur sudu dan memberikan energinya (lebih rendah dibanding saat masuk) kemudian meninggalkan turbin. *Runner* turbin dibuat dari beberapa sudu yang dipasang pada sepasang piringan parallel.



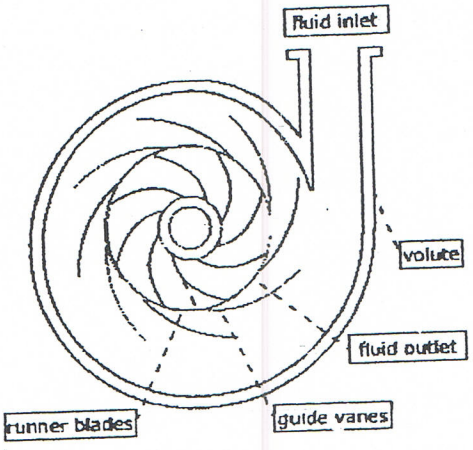
Gambar 3.10 : Turbin Crossflow

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* (bagian turbin yang berputar) dapat berputar. Turbin yang bekerja berdasarkan prinsip ini dikelompokkan sebagai turbin reaksi. *Runner* turbin reaksi sepenuhnya tercelup dalam air dan berada dalam rumah turbin.

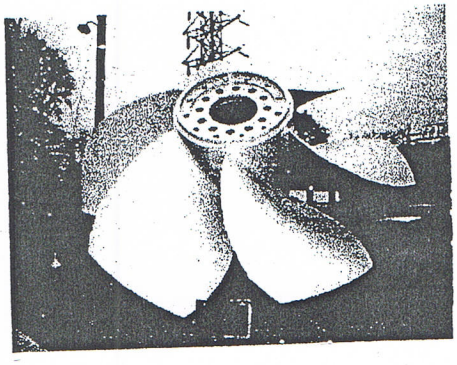
Turbin Francis (Gbr. 3.11) merupakan salah satu turbin reaksi. Turbin dipasang diantara sumber air tekanan tinggi di bagian masuk dan air bertekanan rendah di bagian keluar. Turbin Francis menggunakan sudu pengarah. Sudu pengarah berfungsi mengarahkan air masuk secara tangensial. Sudu pengarah pada turbin Francis dapat merupakan suatu sudu pengarah yang tetap ataupun sudu pengarah yang dapat diatur sudutnya. Untuk penggunaan pada berbagai kondisi aliran air penggunaan sudu pengarah yang dapat diatur merupakan pilihan yang tepat.

Turbin Kaplan dan propeller (Gbr. 3.12) merupakan turbin rekasi aliran aksial. Turbin ini tersusun dari propeller seperti pada perahu. Propeller tersebut biasanya mempunyai tiga hingga enam sudu. Turbin air dengan memakai sudu jenis *hydrofoil* menjadi salah satu turbin yang cocok untuk saluran *ultra low head* yang berupa aliran-aliran sungai. Kecepatan aliran sungai pada umumnya 0 – 2 m/s. Sebagai contoh suatu turbin sungai dengan diameter 600 mm dan jumlah sudu 3 mampu membangkitkan daya

240,61 Watt pada aliran air irigasi dengan kecepatan aliran permukaan 0,92 m/s dan debit 0,2329 m^3/s. Turbin ini dapat dipasang pada sungai maupun saluran irigasi.



Gambar 3.11. Sketsa Turbin Francis



Gambar 3.12 : Turbin Kaplan

Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTMH) pada saluran terbuka (*open channel*) dengan *head* yang rendah air dapat disaiurkan langsung menuju rotor, yang perlu diperhatikan adalah mengusahakan agar tidak timbul pusaran ketika air mendekati/menuju rotor turbin.

Kecepatan air sungai hampir sama dengan karakteristik kecepatan air di saluran dan semakin tidak teratur tampang saluran; distribusi kecepatan semakin tidak seragam; menentukan kecepatan rata-rata (V_m) bisa didekati dengan menggunakan perbandingan V_m / V_o. Untuk jenis material dasar saluran batuan kricak halus sampai dengan menengah perbandingan $V_m / V_o = 0,83$.

Prinsip energi yang diturunkan melalui pipa dapat juga diterapkan pada saluran terbuka. Eenergi kinetik pada saluran terbuka diberikan oleh $V^2/2g$, dengan V adalah kecepatan rerata aliran pada penampang saluran tersebut, apabila koefisien koreksi energi (α) diperhitungkan maka energi kinetik dapat dirumuskan sebagai $E = \alpha.V^2/2g$ dimana nilai α antara $1,05 \div 1,2$ yang tergantung pada distribusi kecepatan.

Turbin merupakan salah satu alat konversi energi. Sebagai contoh *water turbine* dengan poros vertikal mampu mengubah energi aliran air yang mengalir menjadi energi listrik dengan efisiensi 30%, adapun energi air berbanding lurus dengan pangkat tiga dari kecepatannya.

3.2.1 Turbin Darrieus

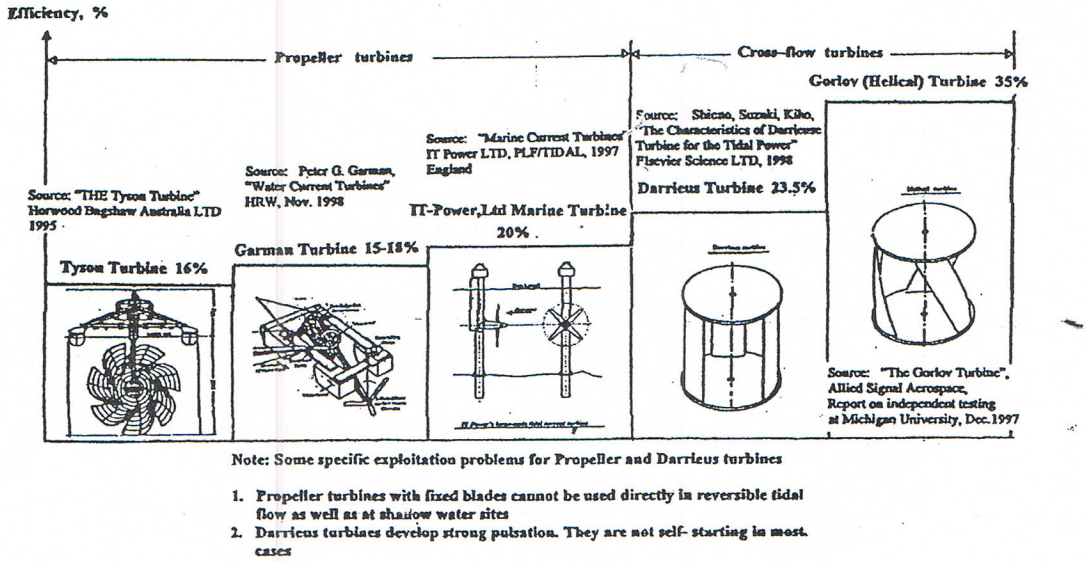
Betz (1919), mengemukakan bahwa batasan untuk mengkonversi energi kinetik fluida ke dalam bentuk energi yang menggerakkan rotor tidak dapat melebihi 59,3%. Batasan ini tidak ada kaitannya dengan efisiensi generator akan tetapi lebih kepada parameter turbin itu sendiri. Batasan ini kemudian dikenal dengan *Betz Limit.*

Aplikasi *hydrofoil* untuk blade turbin sesuai untuk sistem konversi energi pada saluran *ultra low head.* Turbin dengan diameter 600 mm dan jumlah sudu 3 mampu membangkitkan daya 240,61 Watt pada aliran air irigasi dengan kecepatan permukaan air 0,92 m/s dan debit 0,2329 m^3/s. Jenis turbin ini dapat dipasang pada sungai maupun saluran irigasi.

Shiono, et.al (2002), mengemukakan bahwa turbin Darrieus yang diaplikasikan untuk konversi energi arus laut akan lebih efektif apabila model bladenya berbentuk *helical.* Hal ini berdasarkan 7 model turbin yang diuji coba dengan membandingkan performa model blade lurus dan model helical. Untuk model helical efisiensi diperoleh dengan turbin yang mempunyai soliditas 0,4.

Turbin Gorlov mempunyai efisiensi yang paling tinggi dan paling konstan pada kecepatan arus air pada *head* rendah dibandingkan turbin lainnya, yaitu sebesar 35% dengan *Tips Speed Ratio* (TSR) 2 – 2,2. Gorlov (2001) mengemukakan bahwa pemanfaatan energi pasang surut untuk pembangkitan energi listrik adalah salah satu kandidat untuk mempercepat peningkatan penggunaan sumber energi terbarukan. Pengembangan yang terus menerus, efisien, cenderung murah dan ramah lingkungan. Pada aliran *low head* dimanfaatkan turbin *helical* bersudu tiga yang dapat juga didayagunakan pada arus pasang surut. Turbin tersebut dapat membangkitkan multi megawatt dari arus pasang surut namun juga dapat membangkitkan dalam skala beberapa kiloWatt. Lebih lanjut Gorlov mengemukakan bahwa untuk turbin *helical* yang diaplikasikan untuk mengkonversi energi arus laut maupun sungai dapat berkerja dengan efisiensi 35%. Turbin ini merupakan pengembangan dari turbin Darrieus yang mempunyai blade lurus. Antheaume, et.al (2007). Mengemukakan bahwa berdasarkan simulasi dan eksperimen diperoleh efisiensi maksimum untuk turbin darrieus 23%, turbin gorlov 35% dan turbin Archad sebesar 39,4%. Hal ini merupakan inovasi baru dalam pengembangan turbin air poros vertikal dengan model *helical blade.*

Berikut ini adalah data perbandingan tipe turbin dan daerah operasinya seperti pada Gbr.3.13.



Note: Some specific exploitation problems for Propeller and Darrieus turbines

1. Propeller turbines with fixed blades cannot be used directly in reversible tidal flow as well as at shallow water sites
2. Darrieus turbines develop strong pulsation. They are not self- starting in most cases

Gambar 3.13 : Perbandingan tipe turbin *low-head hydro*

Turbin Verdant mempunyai efisiensi yang paling tinggi diantara jenis turbin lainnya seperti diberikan oleh Tabel 5.5.

Tabel 5.5 : Efisiensi dan daerah operasi turbin *low-head hydro*

Turbin	Efisiensi (%)	Daerah Operasi (m/s)
Garman	15-18	> 0,5
Tyson	16	> 0,5
Savonius	19	> 2
Sea Flow	20	> 2
Darrieus	23	> 2
Gorlov	35	> 0,6
Verdant	43	> 2

Georgescu, et.al [24], mengemukakan bahwa aplikasi turbin Archad pada *wind tunnel* dengan memanfaatkan kecepatan aliran angin dengan aplikasi turbin archad pada aliran air menunjukkan kinerja yang hampir sama sehingga ekspektasi untuk menerapkan hukum similaritas dalam konsep pengembangan turbin angin dapat diaplikasikan pada sistem konversi energi arus air.

Turbin berputar dengan memanfaatkan gaya *drag* fluida untuk mendorong sudu turbin yang berbentuk cembung terhadap arah aliran datangnya fluida. Gaya fluida ini juga akan mendorong sudu yang berbentuk cekung terhadap arah aliran fluida. Gaya *drag* yang bekerja pada bagian cekung ini lebih kecil dari bagian cembung, sehingga gaya *drag* pada bagian cekung ini bekerja melawan putaran turbin dan ini yang berakibat pada rendahnya efisiensi turbin.

Mekanisme kerja turbin Darrieus sama halnya dengan Gorlov yang memanfaatkan gaya lift. Gaya *lift* yang dihasilkan oleh sudu turbin didapatkan dari kecepatan sudut turbin yang kemudian mengakibatkan resultan gaya, karena hal ini maka turbin yang memanfaatkan mekanisme gaya *lift* hanya dapat bekerja dengan baik pada kecepatan fluida yang dapat membuat turbin berputar dan menghasilkan kecepatan sudut. Setelah turbin berputar maka efisiensi yang dihasilkan dapat menjadi lebih baik. Perlakuan untuk mencapai kondisi tunak dengan memberikan putaran awal pada poros turbin.

3.2.2 Hydrofoil

Hydrofoil digunakan terutama untuk menghasilkan gaya *lift* yang bekerja pada turbin angin ataupun air agar dapat berputar. Saat ini salah satu referensi untuk pemilihan *hydrofoil* yang popular adalah profil *hydrofoil* yang dibuat oleh *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA). Pengujian yang dilakukan oleh NACA lebih sistematik dengan membagi pengaruh efek kelengkungan dan distribusi ketebalan serta pengujiannya dilakukan pada berbagai bilangan *Reynolds*. Setiap bentuk hydrofoil NACA mempunyai parameter – parameter tersendiri sesuai dengan pengaplikasiannya.

Parameter-parameter yang telah ditentukan menurut standar NACA adalah:

1. Panjang *chord (c)*
2. Maksimum *camber (f)* atau *camber ratio* (f/c) dalam %.
3. Posisi maksimum *camber* (x_f)
4. Ketebalan maksimum hydrofoil (t)
5. Posisi maksimum ketebalan (t_d)
6. Radius *nose* (r_N)
7. Koordinat hydrofoil z_u (x) bagian atas dan z_l (x) bagian bawah.

Gambar 3.14. Parameter geometri hydrofoil tidak simetris

Gambar 3.15 : Hydrofoil simetris

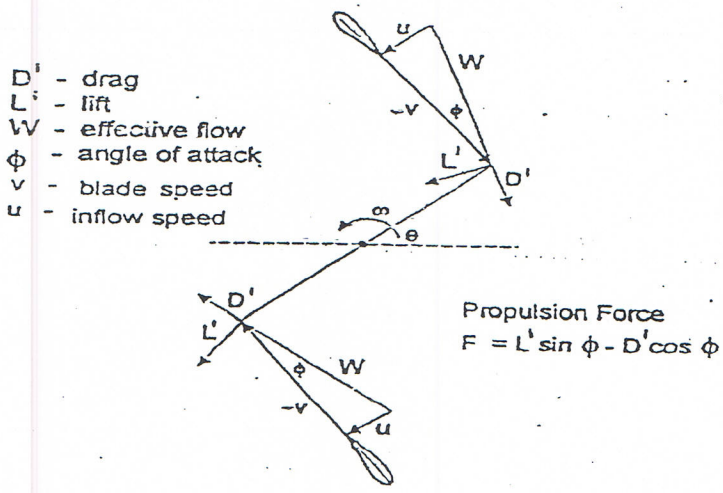
Untuk hydrofoil yang simetris (Gbr. 3.15) maka profil sudu diberikan dengan persamaan berikut :

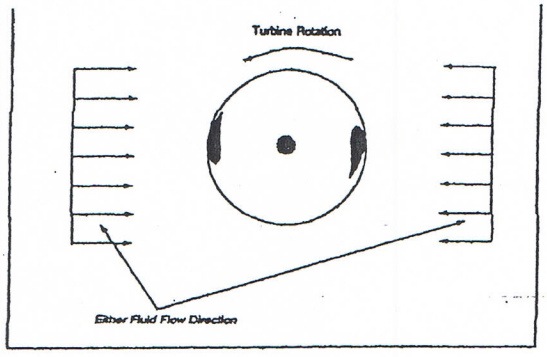
$$y = \pm\left(\frac{t}{C}\right).(1{,}4845.x^{1/2} - 0{,}63.x - 1{,}758.x^2 + 1{,}4215.x^3 - 0{,}5075.x^4$$

dimana t adalah tebal sudu maksimum sudu

C adalah lebar sudu (*chord length*)

Ketika sebuah benda bergerak melalui sebuah fluida, suatu interaksi antara benda dengan fluida terjadi; efek ini dapat digambarkan dalam bentuk gaya-gaya pada pertemuan antar-muka fluida-benda. Gaya resultan dalam arah yang sama dengan kecepatan hulu disebut sebagai *drag*, dan gaya resultan yang tegak lurus terhadap arah kecepatan hulu disebut sebagai *lift* (Gbr. 3.16).

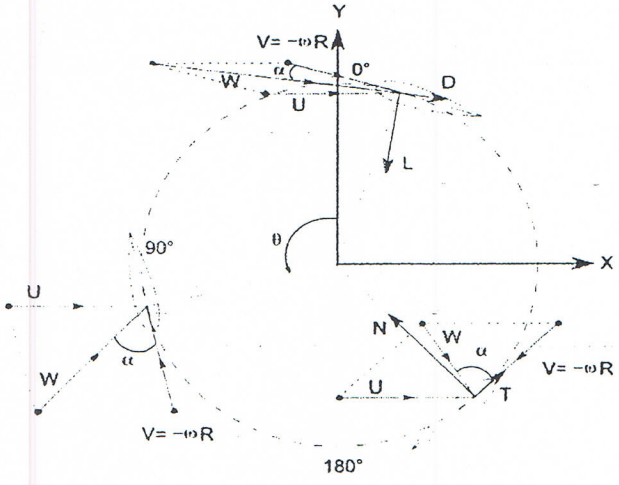




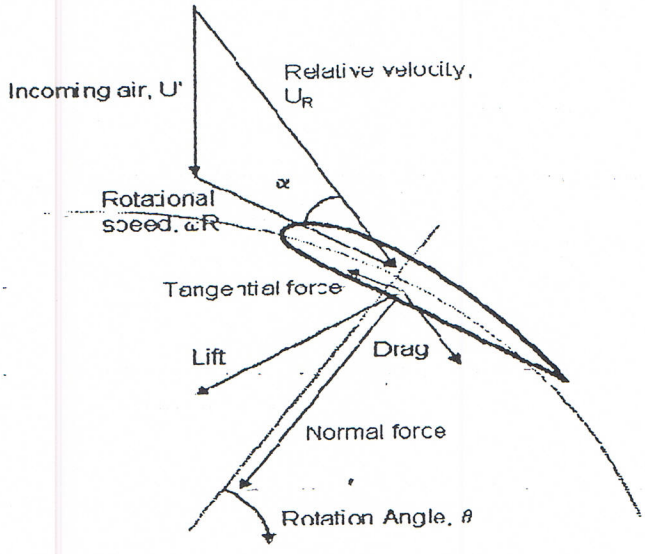
Gambar 3.16 : Segitiga kecepatan hydrofoil

Secara prinsip, kerja turbin air Darrieus ditunjukkan oleh Gbr 3.17 dibawah ini. Sudu pada turbin ini pada umumnya adalah berbentuk aerofoil simetris yang memenuhi standard NACA. Air yang dengan kecepatan U menabrak sudu mengakibatkan *lift* yang merupakan gaya tangensial yang membentuk torsi agar turbin berputar. Turbin akan berputar dengan kecepatan V dan akibat kedua gerak ini maka terdapat gerak relative W. Arah *Lift* akan tegak lurus dengan arah kecepatan relatif. *Lift* (L) inilah yang menimbulkan torsi pada rotor turbin sehingga turbin dapat berputar. *Drag* (D) adalah tahanan dari sudu untuk bergerak.

Ketika rotor ditabrak air maka hydrofoil bergerak dalam arah lintasan lingkar. Begitu air bergerak dalam arah yang berbeda dengan gerak ini maka result air membentuk sudut serang terhadap sudu. Selama sudu bergerak dalam lintasan ini, sudut serang berubah tandanya. Gaya angkat (*Lift*) memnimbulkan gaya normal mengarah ke sumbu poros dan gaya torsi bekerja pada tangent gerak ini. Torsi ini meningkatkan kecepatan gerak turbin dan berguna untuk menggerakkan seperti generator listrik.



(a)



(b)

Gambar 3.17 : Prinsip Kerja sudu turbin air Darrieus

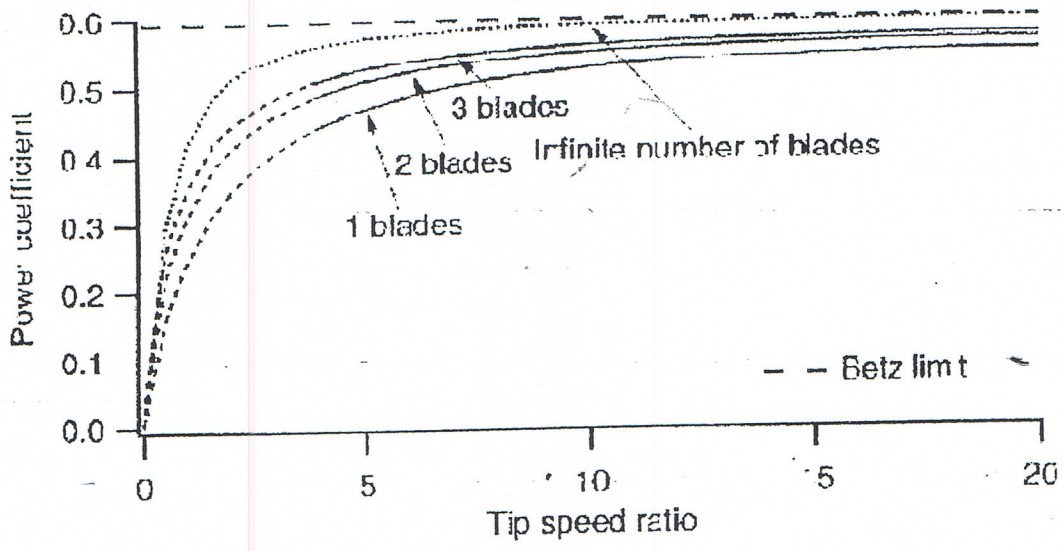
Kecepatan air akan mempengaruhi efisiensi dari turbin yang mana semakin tinggi kecepatan semakin tinggi efisiensinya. Jadi salah satu faktor yang mempengaruhi efisiensi turbin adalah kecepatan air. Semakin besar kecepatan air maka efisiensi semakin naik. Perlu dicatat bahwa untuk berbagai kecepatan air maka profil efisiensi yang fungsi dari *tip speed ratio* (λ) sama bentuknya.

Soliditas turbin Darrieus dirumuskan dengan :

$$\sigma = \frac{nC}{\pi d}$$

dengan n adalah jumlah sudu, C adalah lebar sudu (*chord*), d adalah diameter turbin. Mirsuhiro S et al. [10] telah mempelajari pengaruh lebar sudu C terhadap kinerja turbin Darrieus dan hasil ditunjukkan oleh Gbr. 8. Dari gambar perbedaan efisiensi maksimum sedikit berbeda namun pengaruhnya terhadap λ yang mana lebar C akan membatasi batasan pemakain untuk λ yang tertentu saja.

Jumlah sudu dari turbin Darrieus secara teoritis pengaruhnya terhadapa koefisien daya atau efisiensi ditunjukkan oleh Gbr. 3.18. Pada umumnya jumlah turbin yang dipakai antara 3 atau 4 sudu untuk diameter kecil dan sedang namum untuk diameter yang besar jumlah sudu bisa lebih banyak lagi.



Gambar 3.18 : Pengaruh jumlah sudu terhadap kinerja turbin

3.2.3 Daya Air dan Turbin

Daya keluar poros turbin adalah daya yang output yang dihasilkan oleh turbin. Daya ini adalah yang dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan seperti generator listrik apabila digunakan untuk pembangkit listrik. Secara umum daya dihitung dengan rumus berikut :

$$P = F.U$$

dimana F merupakan gaya tangensial yang memutar rotor turbin sedangkan U merupakan kecepatan tangensial dari rotor turbin atau sudu. Karena rotor turbin bergerak lingkar maka $U = r.\omega$ yang mana r adalah radius turbin dan ω adalah kecepatan sudut turbin [rad/s]. Dengan demikian persamaan diatas ditulis :

$$P = F.\omega.r \qquad (1)$$

Persamaan (1) dapat dihubungkan dengan torsi T yang mana dirumuskan sebagai berikut :

$$T = F.r \qquad (2)$$

Persamaan (1) dan (2) memberikan hubungan brikut :

$$P = T.\omega \qquad (3)$$

Hubungan antara daya turbin dengan daya air masuk ke turbin dinyatakan sebagai koefisien daya atau *Power Coefficient* (*Cp*)

$$C_p = \frac{P_{rotor}}{P_{air}} \qquad (4)$$

Daya air sebagai daya input ke turbin adalah energi kinetik aliran air dengan kecepatan V yang menabrak rotor turbin dengan bidang turbin A diberikan oleh hubungan berikut :

$$P_{air} = \frac{1}{2}\rho A V^3$$

Dengan demikian maka *Power Coefficient* (*Cp*) menjadi :

$$C_P = \frac{T.\omega}{\frac{1}{2}\rho A V^3} \qquad (5)$$

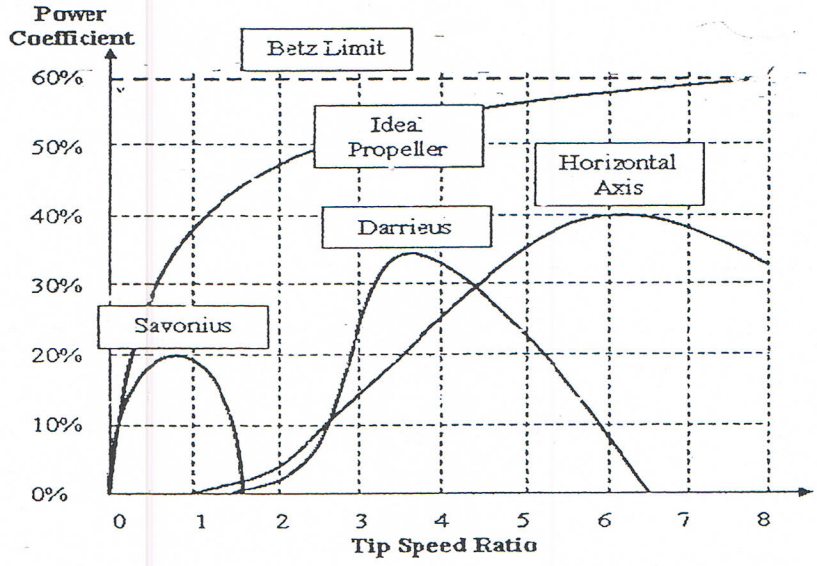
Koefisien torsi dari turbin dihitung dengan rumus sebaagai berikut :

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V^2 A r} \qquad (6)$$

Dimana A adalah luas sudu

r adalah radius turbin

Profil koefisien daya untuk beberapa jenis turbin diberikan oleh Gbr. 3.19.



Gambar 3.19 : Koefisien Daya beberapa jenis sudu turbin

Ditinjau dari sisi mesin konversi dalam hal ini turbin air yang dapat digunakan pada aliran air sungai ada beberap jenis yang sepuluh tahun terakhir berkembang seperti turbin heliks (turbin Gorlov) dan turbin Darrieus. Turbin ini dikembangkan juga sebagai turbin angin (kincir angin) karena prinsip kerja adalah sama. Sehubungan dengan kedua jenis turbin tersebut maka turbin Darrieus lebih praktis untuk dibuat dibandingkan dengan

turbin Gorlov. Masyarakat akan jauh lebih mudah membuat turbin Darrieus dibanding turbin Gorlov sehingga dapat dibuat oleh masyarakat turbin skala kecil dan sedang (mikrohidro). Permasalahan timbul bagaimana untuk meningkatkan efisiensi dari turbin tersebut oleh karena beberapa geometri sudu dapat digunakan untuk turbin tersebut. Geometri sudu pada umumnya adalah yang mengikuti standard NACA. Secara teoritis turbin air untuk aliran sungai mempunyai efisiensi relatif rendah yang mana besarnya sekitar 35%. Efisiensi ini dapat ditingkatkan dengan merubah jumlah sudu, merubah lebar sudu, memakai sudu pengarah dan tergantung dengan jenis sudu yang dipakai. Oleh karena itulah studi ini penulis akan mempelajari pengaruh geometri sudu yang simetris dengan merubah tebal dari sudu dan sudu tidak simetris dengan harapan agar efisiensi turbin dapat ditingkatkan.

Bila sudu turbin dipasang tetap dan tidak dapat diatur maka sudut serang dari sudu akan berubah setiap saat tergantung dengan posisi dari sudu tersebut yang akibatnya merubah gaya dinamik air kepada sudu tersebut dan oleh karena itu turbin cendrung terjadi *shaking*. Oleh karena itu salah satu untuk mengatasinya adalah dengan membuat sudu turbin dapat diatur *pitch* atau sudut sudunya [17]. Selain itu dapat meningkatkan *self-starting torque* dan efisiensi turbin.

Salah satu kelemahan turbin Darrieus adalah rendahnya *self-starting torque,* oleh karena itu Kyuzuka [18] menggabungkan sudu turbin Savonius untuk mengatasi hal tersebut. Oleh karena itu dengan mengkombinasikan sudu tersebut yang posisinya lebih dekat dengan poros akan meningkatkan tarsi awal turbin secara signifikan.

Beberapa jenis dan geometri sudu telah diberikan oleh Claessens [19] tentang kinerjanya pada turbin angin Darrieus. Untuk sudu NACA 0021,0018 dan 0015 koefisien daya praktis sama besarnya namun beroperasi pada TSR yang sedikit berbeda. NACA 0021 batas operasi yang baik pada TSR 1,5 – 4,3 untuk NACA 0018 pada 2,0 – 4,3 dan NACA 0015 pada 2,2 – 4,3 sedangkan NACA 0012 pada batas yang sempit yaitu 3,0 – 4,3 dan efisiensi yang paling rendah diantara ketiga sudu diatas.

Kondisi aliran mempengaruhi kinerja sudu dari turbin. Diantara beberapa jenis sudu diatas maka sudu yang baik untuk semua kecepatan aliran ada jenis sudu NACA 0015 dan 0018 karena mempunyai koefisien *lift* bergerak naik seeiring dengan kenaikan kecepatan aliran, namun tidak sama halnya dengan sudu NACA 0012 dan 0015 yang mana koefisien *lift* mulai bergerak naik mulai pada saat Reynolds tertentu [3].

Claessens [19] telah mengembangkan geometri jenis sudu DU-06-W-200 yang merupakan pengembangan dari sudu NACA 0020 namun pada bagian dekat leading edge salah satu busurnya dibuat lengkung kedalam dan dekat dengan leading edge salah satu sisinya kelengkungannya bergeser kedepan. Hasil simulasi dari sudu jenis ini mempunyai koefisien daya lebih tinggi dan TSR batas operasi lebih besar.

Soliditas turbin mempengaruhi batasan penggunaan turbin Darrieus yang mana hal ini telah diberikan studi secara eksperimental dan teoritis oleh Hilton [20] untuk soliditas 0,18, 0,24 dan 0,3 dengan memakai sudu simetris NACA 0015. Apabila soliditas naik maka batas operasi turbin maksimum pada TSR < 4,3 akan tetapi bila soliditas turrun maka batas operasi besar namum efisiensi maksimumnya praktis sama.

Kinerja turbin tergantung dengan kecepatan air, soliditas, dan sudut kemiringan sudu yang telah ditunjukkan oleh Shiono et al. [21]. Studi menunjukkan bahwa efisiensi turbin akan naik apabila kecepatan air naik, untuk kecepatan air 1,4 m/s efisiensi maksimum adalah sekitar 17% dan bila kecepatan turun menjadi 0,6 m/s maka efisiensi maksimum adalah sekitar 11% yang terletak batas TSR antara 0,8 – 2,0. Soliditas yang terbaik adalah antara 0,2 – 0,3. Selain itu dengan membuat sudu miring dengan sudu tertentu maka turbin menjadi turbin heliks (Gorlov). Torsi yang terbesar terjadi pada sudut kemiringan sudu 90° (tubin Darrieus).

Penggunaan *software fluent* untuk studi kinerja turbin Darrieus telah diberikan oleh Lain et al. [22] dan dari hasil simulation telah divalidasi secara eksperimental. Dengan model turbin mempunyai tiga sudu maka batas operasi turbin adalah anatara 1,2 – 2,0 dan turbin mempunyai efisiensi maksimum sekitar 30% pada TSR 1,74.

Sebagian besar sudu turbin Darrieus menggunakan sudu berstandard NACA jenis simetris, namun Batten [23] mencoba menggunakan sudu tak-simetris untuk mengetahui kinerja turbin air Darrieus karena sudu tersebut dapat mengurangi kavitasi yang terjadi atau mengurangi tekanan minimum yang terjadi. Jenis sudu seri NACA 63-2XX dan 63-8XX telah digunakan dalam studi ini. dengan memakai teori *blade element momentum* kedua sudu ini menunjukkan bahwa turbin dengan memakai kedua sudu ini mempunyai perbedaan kinerja yang sangat kecil dan dapat diabaikan.

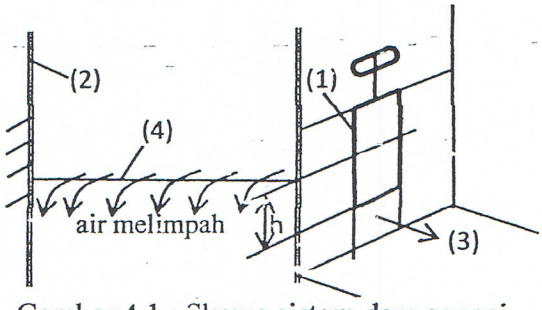
Ketebalan sudu mempengaruhi kuat tidaknya sudu turbin, sudu yang tebal mempengaruhi pada semakin besarnya tahanan (*drag*) pada sudut serang yang kecil dan kekuatannya besar. Ketebalan yang optimum sulit ditentukan. Pada umumnya ketebalan sudu 12% sampai 18% sering kali digunakan.

Turbin Darrieus sangat mudah dibuat dibandingkan dengan turbin aliran sungai Gorlov karena memakai sudu lurus, sedangkan turbin Gorlov memakai sudu heliks. Pemakaian sudu lurus untuk turbin Darrieus mempunyai beberapa variasi ketebalan yang mana batasan pemakaian ketebalan belum diberikan secara jelas. Dalam studi ini, diberikan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh geometri dalam hal ini adalah ketebalan dari sudu yang simetris (NACA 00XX) dan geometri sudu yang tidak simetris dalam hal ini NACA 4424.

BAB 4
METODE PENELITIAN

4.1 Sistem Aliran Air

Pengujian ini dilakukan pada saluran keluaran pintu air (1) dam irigasi di sungai kelingi Lubuk Linggau. Skema dam untuk irigasi diberikan pada Gbr.4.1. Sungai didam sehingga akan terjadi *overflow* (melimpah) apabila permukaan air sungai naik karena curah hujan tinggi sehingga permukaan sungai akan naik melebihi tinggi dam dan air akan melimpah (4) yang kemudian terjun kembali ke sungai. Pada salah satu dinding sungai (2) dipasang pintu air (1) yang diangkat sebagian sehingga air (3) akan keluar mengalir pada saluran irigasi. Dengan sistem ini kecepatan air akan konstan karena head, *h* adalah selalu konstan karena tinggi permukaan air / dam konstan. Oleh karena itu pengukuran dapat diiakukan pada kecepatan air yang selalu konstan. Posisi pengukuran pada jarak sekitar 5 m dari pintu air dan dengan kondisi ini diharapkan kecepatan aliran air sudah seragam pada saluran setelah keluar dari pintu air.

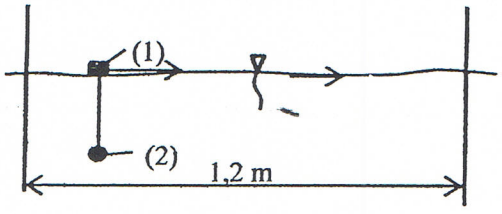


Gambar 4.1 : Skema sistem dam sungai

Pada sistem dam sungai ini ada 3 pintu air yang mana pembukaanya sama besarnya sehingga permukaan saat keluar dari pintu adalah sama. Dari ketiga aliran keluar dari pintu ini ada satu pintu yang mana aliran air yang kelihatannyanya kecepatannya tidal sama dan banyak berturbulensi. Oleh karena itu berdasarkan hasil pengamata ada satu pintu yang mana kecepatan airnya seragam sesuai arah memanjang dari saluran air dan dipilihlah saluran tersebut untuk pengukuran.

Kecepatan aliran air keluar dari saluran pintu air (3) diukur dengan cara konvensional yaitu dengan meletakkan gabus kecil (1) yang diikat dengan dengan benang panjang 30 cm dan pada ujungnya diberi beban pemberat (2) (Gbr. 4.2). Jarak yang ditempuh ditentukan sejauh 1,2 m yang mana hal ini disesuaikan dengan kondisi ukuran

saluran keluar dari pintu air. Kemudian gabus yang diatas dipasang pada aliran air dan ia akan bergerak menuruti aliran air. Waktu yang ditempuhnya diukur dengan *digital stop watch.* Dari kedua variabel ini didapatkan waktu pengukuran rat-rata untuk lima kali pengkuran adalah 1,52 detik sehingga kecepatan air $V = 0{,}7895$ m/s.



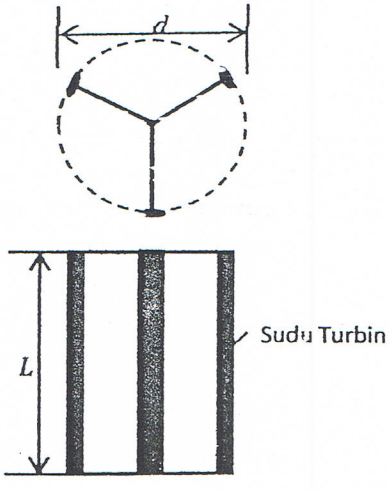
Gambar 4.2 · Pengukuran kecepatan air

4.2 Rotor Turbin Darrieus

Turbin yang digunakan berdiameter dipilih berdiameter $d = 300$ mm dan panjang $L = 300$ mm yang mempunyai jumlah sudu $B = 3$ buah (Gbr. 4.3). Untuk sudu simetris NACA 00XX diambil soliditas turbin $\sigma = 0{,}2$ maka dengan demikian lebar sudu (*chord*) C turbin haruslah sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{CB}{\pi d} \quad \text{atau} \quad C = \frac{\sigma \pi d}{B}$$

sehingga $C = 62{,}8$ mm.

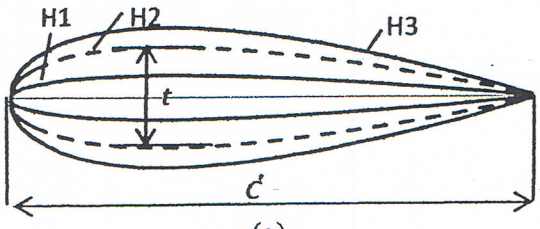


Gambar 4.3 : Turbin Darrieus

Untuk sudu tak-simetris yang dalam hal ini diambil NACA 4424, diambil lebar sudu $C = 110$ mm dan tebal maksimum $t = 24$ mm. Dengan demikian maka soliditas turbin $\sigma = 0{,}35$.

4.3 Sudu Turbin

Sudu simetris yang digunakan mempunyai ketebalan *t* yang bervariasi yang dinyatakan dalam NACA 0015 kita sebut H1, NACA 0020 disebut H2, NACA 0030 disebut H3 (Gbr. 4.4a) dan sudu tak-simetris adalah NACA 4424 disebut H4 (Gbr. 4.4b).



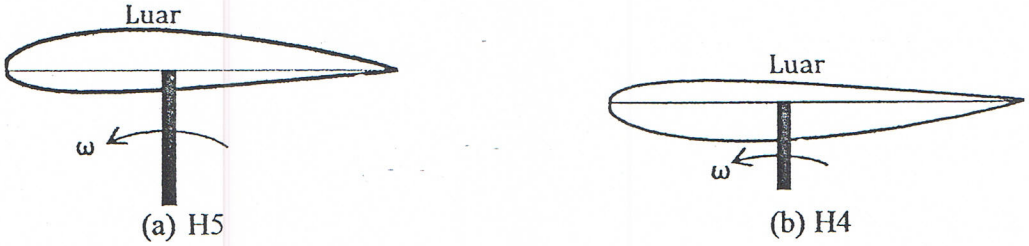
(a)

(b)

Gambar 4.4 : Sudu hydrofoil simetris (a) dan tak-simetris (b)

Untuk sudu tak-simetris akan dipasangkan pada rotor dengan dua posisi yaitu :

1. Posisi sudu dimana dinding sudu yang lengkung dipasang pada bagian dalam dari rotor (Gbr. 4.5b) dan kita sebut geometri H4.
2. Posisi sudu dimana dinding sudu yang lengkung dipasang pada bagian luar dari rotor (Gbr. 4.5a) dan kita sebut geometri H5



(a) H5 (b) H4

Gambar 4.5 : Posisi sudu terhadap rotor

Geometri sudu turbin tak-simetris diberikan nilai kordinat dan absisnya seperti dalam tabel 4.1.

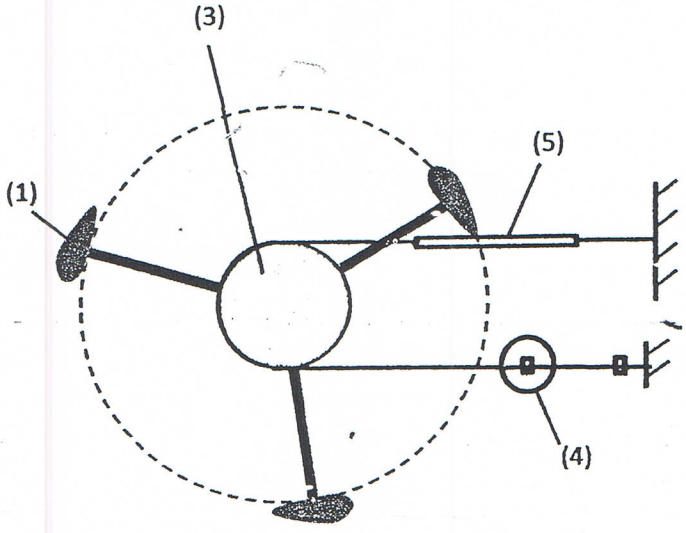
Tabel 4.1 : Ordinat gambar sudu

Upper surface		Lower surface	
Stattion	Ordinate	Station	Ordinate
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,5000	3,9028	0,5000	-1,4753
0,7500	4,4056	0,7500	-1,9419
1,2500	5,2224	1,2500	-2,6728
2,5000	6,7557	2,5000	-3,9444
5,0000	8,8835	5,0000	-5,5242
7,5000	10,4357	7,5000	-6,5278
10,0000	11,6568	10,0000	-7,2203
15,0000	13,4541	15,0000	-8,0418
20,0000	14,6471	20,0000	-8,3865
25,0000	15,3904	25,0000	-8,4278
30,0000	15,7661	30,0000	-8,2676
35,0000	15,8265	35,0000	-7,9760
40,0000	15,6060	40,0000	-7,6060
45,0000	15,1469	45,0000	-7,1770
50,0000	14,5083	50,0000	-6,6709
55,0000	13,7072	55,0000	-6,1114
60,0000	12,7576	60,0000	-5,5125
65,0000	11,6646	65,0000	-4,8890
70,0000	10,4388	70,0000	-4,2486
75,0000	9,0811	75,0000	-3,5986
80,0000	7,5928	80,0000	-2,9423
85,0000	5,9732	85,0000	-2,2806
90,0000	4,2171	90,0000	-1,6125
95,0000	2,3169	95,0000	-0,9354
100,0000	0,2638	100,0000	-0,2452

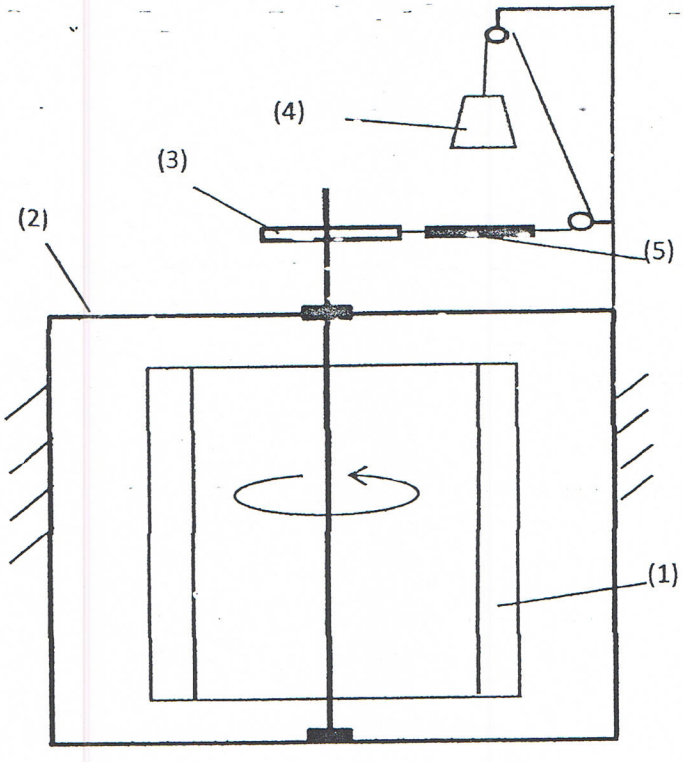
4.4 Prosedur Pengujian

Skema instalasi turbin ditunjukkan oleh Gbr. 4.6 dibawah ini. Turbin dimasukkan kedalam aliran air sampai kerangka (2) dan pulley torsi (3) berada beberapa centimeter diatas permukaan air dengan demikian maka sudu (1) akan bergerak melingkar atau rotor akan berputar. Untuk satu jenis sudu yang digunakan, tanpa dibebani dengan pembeban (4) maka turbin akan berputar setelah dicelupkan di aliran sungai dan setelah beberapa menit kemudian putaran turbin diukur dengan *digital tachometer* dengan menyorotkan sinar keluar dari *tachometer* ke pulley torsi (3). Diameter pulley torsi adalah 65 mm. Sistem pengukuran torsi dengan dynamometer pita yang mana pita/tali terbuat dari kulit yang bersentuhan dengan pulley torsi/pulley. Setelah itu turbin dibebabani dengan suatu masa (4), dalam hal ini batu kecil (sebut m_1) yang sudah ditimbang terlebih dahulu, dan kemudian dengan adanya pembebanan yang kecil ini maka turbin akan menurun putarannya yang setelah didiamkan beberapa menit agar putaran sudah konstan diukur lagi putaran pulley torsi / turbin dan diukur pula gaya pada *tubular spring scale* (5) yang mempunyai batas gaya maksimum 1000 gram. Setelah selesai pengukuran maka masa pembeban ditambah lagi masa sebesar m_2 (sudah ditimbang) dan akibatnya putaran turbin akan menurun yang setelah stabil operasinya dilakukan pengukuran putaran lagi dan gaya pada *tubular spring scale*.

Pengukuran dilakukan seperti diatas untuk seterusnya prosedur pengukuran dilakukan dengan menambah beban sampai pada suatu saat dimana dengan suatu pembebanan tertentu turbin akan berhenti berputar. Setelah selesai maka sudu turbin diganti dengan bentuk yang lain dan prosedur pengukuran sama seperti diatas. Perlu dicatat bahwa pengukuran atau pengambilan data untuk setiap putaran, operasi turbin ditunggu beberapa saat sampai dia stabil perputarnnya. Pembebanan dengan suatu masa dalam hal ini adalah batu-batu kerikil yang bervariasi berat dan diameternya yang digunakan untuk pembenanan tertentu.



(a) Pandangan Atas



(b) Pandangan Utama

Gambar 4.6 : Skema turbin dan sistem pengujian

BAB 5
HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Pengukuran dan Pengolahan

Dari pengukuran kecepatan air didapatkan waktu yang ditempuh oleh gabus dalam jarak 1,20 m adalah 1,52 detik sehingga kecepatan air adalah 1,2/1,52 = 0,7895 m/s. Kecepatan ini adalah konstan karena sistem dam seperti diterangkan pada bab sebelumnya.

Gaya pada pegas F_{pegas} dan pada beban F_{beban} akan menghasilkan gaya yang menimbulkan torsi pada pulley torsi yang besarnya adalah $\Delta F = F_{pegas} - F_{beban}$. Contoh perhitungan ambil untuk NACA 0015 dalam table 1 pada putaran 115 rpm. Dengan demikian maka

$$\Delta F = F_{pegas} - F_{beban}$$
$$= 400 - 50$$
$$= 350 \text{ gram}$$
$$= 0{,}350 \times 9{,}81$$
$$= 3{,}43 \text{ N}$$

Kecepatan sudut pada putaran tersebut adalah

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$
$$= \frac{2.\pi.115}{60}$$
$$= 12{,}0367 \text{ rad/s}$$

Kecepatan tangensial sudu adalah

$U_{sudu} = r.\ \omega$ dimana r adalah radius rotor turbin

$$= 0{,}15.12{,}0367$$
$$= 1{,}8055 \text{ m/s}$$

Daya turbin adalah

$$P_{turbin} = T.\ \omega$$
$$= \Delta F.r_{\text{pulley torsi}} \cdot \omega$$

$= 3{,}43 \times 0{,}0325 \times 12{,}0367$

$= 1{,}3418$ Watt

Daya air (daya input) adalah

$$P_{air} = \frac{1}{2}.\rho.A.V_{air}^3$$

dimana A adalah luas bidang turbin yang tegak lurus dengan arah air

$$P_{air} = \frac{1}{2}.1000.d.L.V_{air}^3$$

$$= \frac{1}{2}.1000.0{,}30.0{,}30.0{,}7896^3$$

$= 22{,}05$ Watt

Efisiensi η identik dengan koefisien daya yang ditulis sebagai berikut :

$$\eta = \frac{P_{keluar}}{P_{masuk}} \text{ atau}$$

Koefisien daya

$$C_p = \frac{P_{keluar.turbin}}{P_{masuk}}$$

$$= \frac{1{,}3418}{22{,}05}$$

$= 0{,}0609$

Tip Speed Ratio (λ) adalah perbandingan kecepatan tangensial rotor atau sudu dengan kecepatan air. Pada putaran 115 rpm didapatkan :

$$\lambda = \frac{U_{sudu}}{V_{air}}$$

$$= \frac{1{,}8055}{0{,}7895}$$

$= 2{,}287$

Untuk perhitungan pada nilai putaran yang lain sama prosesnya seperti diatas dan hasil perhitungan diberikan dalam tabel 5.1 dibawah ini.

Tabel 5.1 : Hasil Pengukuran dan Pengolahan

1. H1 (NACA 0015)

HASIL PENGUKURAN				HASIL PENGOLAHAN							
n (rpm)	F_{pegas} (kg)	F_{beban} (kg)	ΔF (N)	V_{air} (m/s)	W_{sudut} (r/s)	U_{sudu}	P_{turbin} (Watt)	P_{air} (Watt)	λ	Cp	T (Nm)
121	0	0	0	0,7895	12,6647	1,8997	0	22,05	2,4063	0	0
115	400	50	3,43	0,7895	12,0367	1,8055	1,3418	22,05	2,2870	0,0609	0,1114
112	580	80	4,9	0,7895	11,7227	1,7584	1,8668	22,05	2,2273	0,0847	0,1592
110	650	100	5,39	0,7895	11,5133	1,727	2,0168	22,05	2,1875	0,0915	0,1751
102	800	106	6,8012	0,7895	10,6760	1,6014	2,3598	22,05	2,0284	0,1070	0,2210
90	950	110	8,232	0,7895	9,4200	1,413	2,5202	22,05	1,7898	0,1143	0,2675
0	1000	150	8,33	0,7895	0	0	0	22,05	0	0	0,2707

2. H2 (NACA 0020)

HASIL PENGUKURAN				HASIL PENGOLAHAN							
n (rpm)	F_{pegas} (kg)	F_{beban} (kg)	ΔF (N)	V_{air} (m/s)	W_{sudut} (r/s)	U_{sudu}	P_{turbin} (Watt)	P_{air} (Watt)	λ	Cp	T (Nm)
123	0	0	0	0,7895	12,8740	1,9311	0	22,05	2,4461	0	0,0000
119	350	20	3,234	0,7895	12,4553	1,8683	1,3091	22,05	2,3665	0,0594	0,1051
116	450	40	4,018	0,7895	12,1413	1,8212	1,5855	22,05	2,3069	0,0719	0,1306
115	500	50	4,41	0,7895	12,0367	1,8055	1,7252	22,05	2,2870	0,0782	0,1433
111	620	60	5,488	0,7895	11,6180	1,7427	2,0722	22,05	2,2074	0,0940	0,1784
103	800	90	6,958	0,7895	10,7807	1,6171	2,4379	22,05	2,0483	0,1106	0,2261
0	1100	110	9,702	0,7895	0	0	0	22,05	0	0	0,3153

3. H3 (NACA 0030)

HASIL PENGUKURAN				HASIL PENGOLAHAN							
n (rpm)	F_{pegas} (kg)	F_{beban} (kg)	ΔF (N)	V_{air} (m/s)	W_{sudut} (r/s)	U_{sudu}	P_{turbin} (Watt)	P_{air} (Watt)	λ	Cp	T (Nm)
115	0	0	0	0,7895	12,0367	1,8055	0	22,05	2,2870	0	0,0000
105	350	20	3,234	0,7895	10,9900	1,6485	1,1551	22,05	2,0881	0,0524	0,1051
102	420	40	3,724	0,7895	10,6760	1,6014	1,2921	22,05	2,0284	0,0586	0,1210
100	480	50	4,214	0,7895	10,4667	1,57	1,4335	22,05	1,9887	0,0650	0,1370
95	650	60	5,782	0,7895	9,9433	1,4915	1,8635	22,05	1,8892	0,0847	0,1879
85	880	90	7,742	0,7895	8,8967	1,3345	2,2385	22,05	1,6904	0,1015	0,2516
0	1000	110	8,722	0,7895	0	0	0	22,05	0	0	0,2835

4. H4 (NACA 4424 bagian lurus sebelah luar)

HASIL PENGUKURAN				HASIL PENGOLAHAN							
n (rpm)	F_{pegas} (kg)	F_{beban} (kg)	ΔF (N)	V_{air} (m/s)	W_{sudut} (r/s)	U_{sudu}	P_{turbin} (Watt)	P_{air} (Watt)	λ	Cp	T (Nm)
65	0	0	0	0,7895	6,8033	1,0205	0	22,05	1,2926	0	0
62	350	20	3,234	0,7895	6,4893	0,9734	0,6821	22,05	1,2330	0,0309	0,1051
61	450	40	4,018	0,7895	6,3847	0,9577	0,8337	22,05	1,2131	0,0378	0,1305
60	520	50	4,606	0,7895	6,2800	0,942	0,9401	22,05	1,1932	0,0426	0,1496
59	780	60	7,056	0,7895	6,1753	0,9263	1,4161	22,05	1,1733	0,0642	0,2293
0	1100	110	9,702	0,7895	0	0	0	22,05	0	0	0,3153

5. H5 (NACA 4424 bagian lurus sebelah dalam)

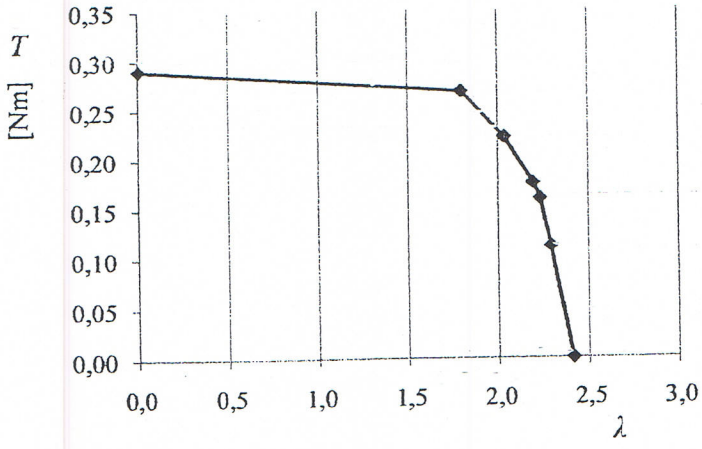
HASIL PENGUKURAN				HASIL PENGOLAHAN							
n (rpm)	F_{pegas} (kg)	F_{beban} (kg)	ΔF (N)	V_{air} (m/s)	W_{sudut} (r/s)	U_{sudu}	P_{turbin} (Watt)	P_{air} (Watt)	λ	Cp	T (Nm)
85	0	0	0	0,7895	8,8967	1,3345	0	22,05	1,6904	0	0
82	400	20	3,724	0,7895	8,5827	1,2874	1,0388	22,05	1,6307	0,0471	0,1210
79	600	40	5,488	0,7895	8,2687	1,2403	1,4748	22,05	1,5710	0,0669	0,1784
76	750	50	6,86	0,7895	7,9547	1,1932	1,7735	22,05	1,5114	0,0804	0,2230
71	920	60	8,428	0,7895	7,4313	1,1147	2,0355	22,05	1,4120	0,0923	0,2739
0	1100	110	9,702	0,7895	0	0	0	22,05	0	0	0,3153

5.2 Pembahasan

Salah satu parameter kinerja turbin adalah torsi yang dihasilkan oleh turbin. Torsi yang diukur pada pulley torsi adalah sama dengan torsi yang dihasilkan oleh turbin oleh karena energi yang dihasilkan adalah konstan untuk suatu putaran dan pembenanan yang konstan pula. Torsi dihitung dengan hubungan $T = \Delta F.\ r_p$ yang mana ΔF adalah gaya bersih (tabel 5.1 diatas) dan r_p adalah radius pulley torsi yang besarnya 32,5 mm. Perlu dicatat bahwa studi pengaruh ketebalan atau jeins sudu simetris yang digunakan adalah untuk soliditas 0,2 dan studi bentuk sudu tak-simetris digunakan soliditas 0,35.

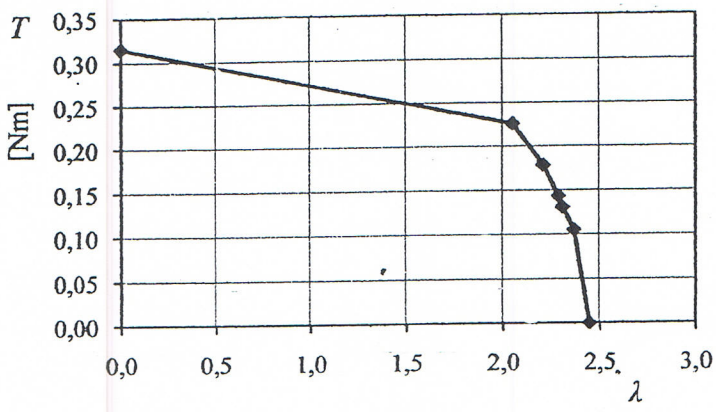
Gbr. 5.1 memberikan perubahan torsi terhadap λ (*Tip Speed Ratio*) untuk jenis sudu NACA 0015. Pada saat turbin tanpa beban maka putaran yang dihasilkan adalah maksimum atau λ maksimum. Ketika dimulai pembenanan maka putaran turun dan torsi akan maksimum saat turbin dibebani maksimum dan turbin berhenti berputar. Profil torsi berbentuk profil lengkung pada daerah $1,65 < \lambda < 2,45$. Untuk $\lambda < 1,65$ maka profil dapat dianggap linier oleh karena sistem pengukuran tidak sensitive terhadap perubahan pembebanan yang kecil. Namun sesungguhnya torsi pada kondisi turbin tidak berputar tidaklah penting karena sesungguhnya diinginkan turbin menghasilkan putaran yang dapat menggerakkan sesuatu seperti generator listrik.

Batas maksimum torsi yang dihasilkan adalah 0,2675 Nm pada putaran $\lambda = 1,67$ dan turbin tanpa beban maka putaran maksimum adalah $\lambda = 2,4063$.



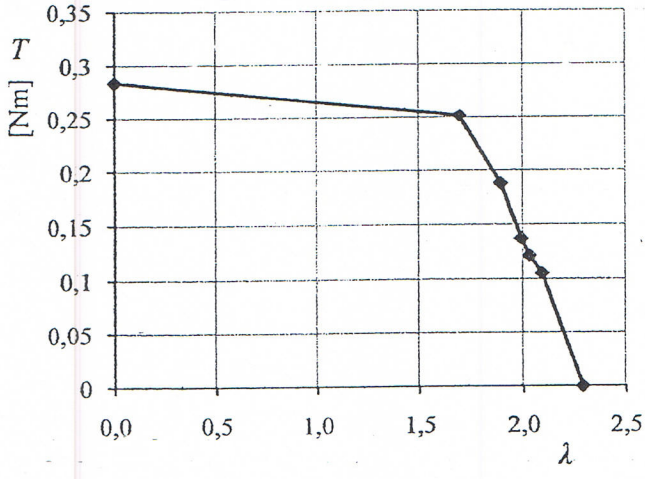
Gambar 5.1 : Torsi untuk NACA 0015

Profil pengaruh torsi terhadap λ untuk sudu jenis NACA 0020 diberikan oleh Gbr. 5.2. Torsi maksimum ketika turbin dibebani maksimum adalah sebesar 0,315 Nm dan profil torsi adalah lengkung dalam daerah pengamatan $2,1 < \lambda < 2,45$.



Gambar 5.2 : Torsi untuk NACA 0020

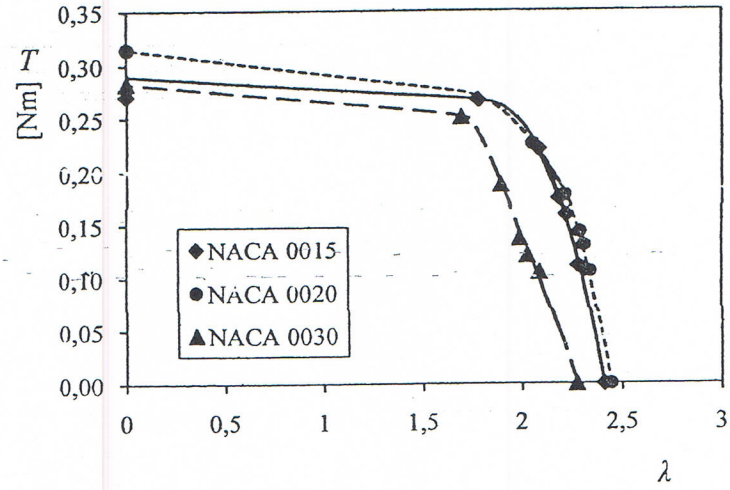
Untuk sudu NACA 0030 profil torsi ditunjukkan oleh Gbr. 5.3. Pada Gbr dapat dilihat bahwa untuk sudu tersebut kecendrungan profil torsi adalah linier dalam daerah $1,65 < \lambda < 2,25$. Perubahan torsi dalam daerah ini signifikan dan berbanding lurus dengan λ.



Gambar 5.3 : Torsi untuk NACA 0030

Pengaruh torsi untuk beberapa jenis sudu dengan ketebalan yang berbeda yang dinyatakan dengan symbol standard NACA 0015, 0020 dan 0030 diberikan pada Gbr. 5.4. Sebagai contoh NACA 0015 maka ketebalan maksimum dari sudu adalah 155 dari lebar

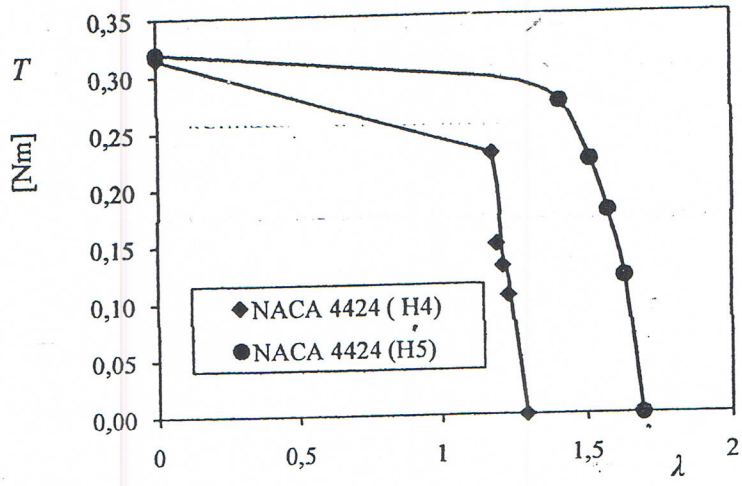
sudu atau *chord*. Dapat kita lihat bahwa torsi praktis sama dalam batas $1,4 < \lambda < 2,5$ untuk sudu NACA 0015 dan 0020 namun untuk NACA 0030 torsi turun pada λ yang sama. Perubahan-perubahan yang signifikan yang terjadi di daerah ini merupakan batasan daerah operasi dari turbin. Perubahan ketebalan akan merubah batasan kecepatan operasi dari λ dan semakin naik ketebalan semakin menurun kecepatan turbin. Hal ini sesungguhnya disebabkan oleh semakin tebalnya sudu yang menyebabkan semakin besarnya *drag* akibat gesekan dan gradient tekana semakin besar. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa penggunaan sudu NACA 0015 s.d 0020 karakteristik torsi yang dihasilkan sama dan dalam pemilihan penggunaan dalam perancangan lebih dipilih yang lebih kuat sehingga sudu tidak mudah melentur.



Gambar 5.4 : Pengaruh Torsi terhadap jenis sudu

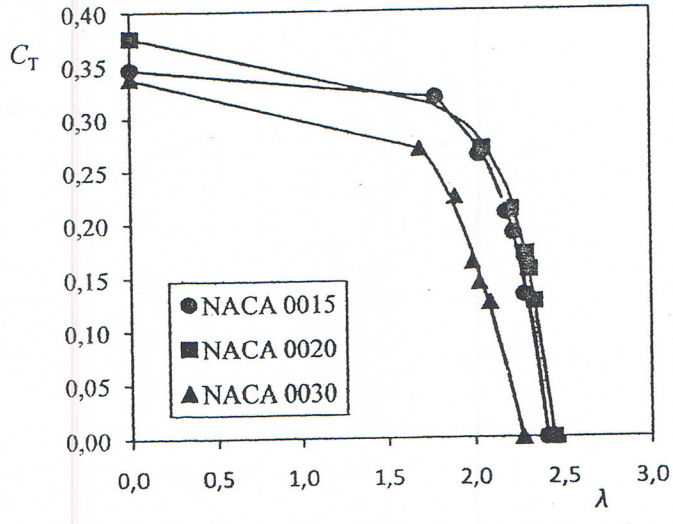
Penggunaan sudu tak-simetris yaitu dalam hal ini NACA 4424 dengan soliditas 0,35 memberikan hasil profil torsi seperti pada Gbr. 5.5. Dari Gbr. Dapat dilihat bahwa perbedaan pemasangan sudu tak-simetris menghasilkan torsi yang sangat berbeda yang mana untuk sudu dimana bagian lengkung sudu menghadap kedalam poros (H4) batas operasi turbin sangat sempit yaitu $1,15 < \lambda < 1,30$ sedangkan untuk sudu bagian lengkung menghadap keluar poros maka daerah operasi turbin disekitar $1,4 < \lambda < 1,7$. Sudu dengan pemasangan bagian lengkung menghadap keluar poros menghasilkan torsi lebih besar. Namun apabila turbin menghasilkan torsi yang sama maka haruslah turbin beroperasi pada λ yang berbeda. Perlu dicatat bahwa semakin besar nilai λ suatu operasi turbin maka semakin baik kinerja turbin tersebut karena dengan kecepatan tinggi maka sudut serang

semakin kecil dan semakin kecil kemungkinan terjadinya *stall* aliran di sekitar sudu. Terjadinya *stall* akan mengurangi kinerja turbin turbin.



Gambar 5.5 : Pengaruh Torsi terhadap geometri sudu NACA 4424

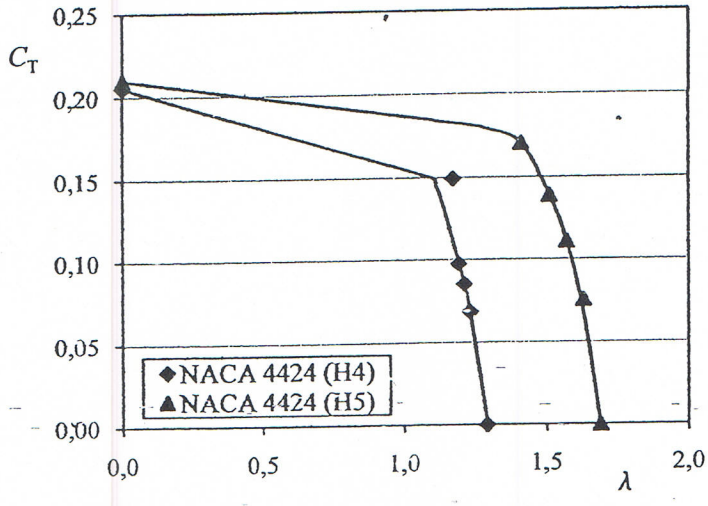
Koefisien torsi untuk sudu simetris NACA 0015, 0020, dan 0030 diberikan oleh Gbr. 5.6 dibawah ini. Dapat kita lihat bahwa profil koefisien torsi bentuknya sama dengan profil dari nilai torsi (Gbr. 5.4). Dalam perhitungan koefisien ini maka torsi dalam nilai absolutnya dibagi dengan torsi ideal dari turbin. Oleh karena itu dari turbin dengan soliditas 0,2 maka didapatkan koefisien torsi seperti pada Gbr. 5.6 yang mana apabila ukuran turbin berubah namun soliditasnya tetap yaitu 0,2 maka akan menghasilkan koefisien torsi tersebut.



Gambar 5.7 : Koefisien torsi untuk sudu simetris

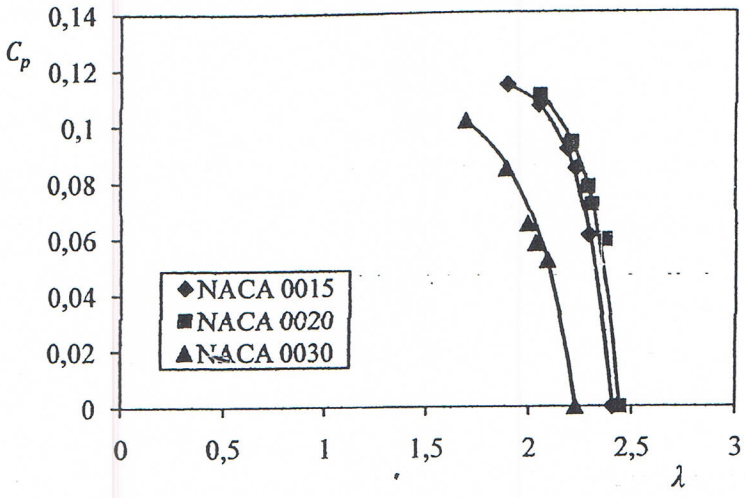
Kondisi pembebanan antara $0 < \lambda < 1{,}25$ yang mana berupa profil linier disebabkan oleh tidak sensitifnya sistem pengukuran torsi sehingga tidak dapat dibebani dengan pertambahan yang kecil sekali.

Untuk koefisien torsi turbin memakai sudu tak-simetris ditunjukkan oleh Gbr 5.9. kelihatannya profil menunjukkan yang sama pada kondis H4 dan H5, namun pemakain sudu H5 (bagian lengkung menghadap keluar) lebih baik kinerjanya karena *tip speed ratio* lebih tinggi dari sudu dengan kondisi H4.



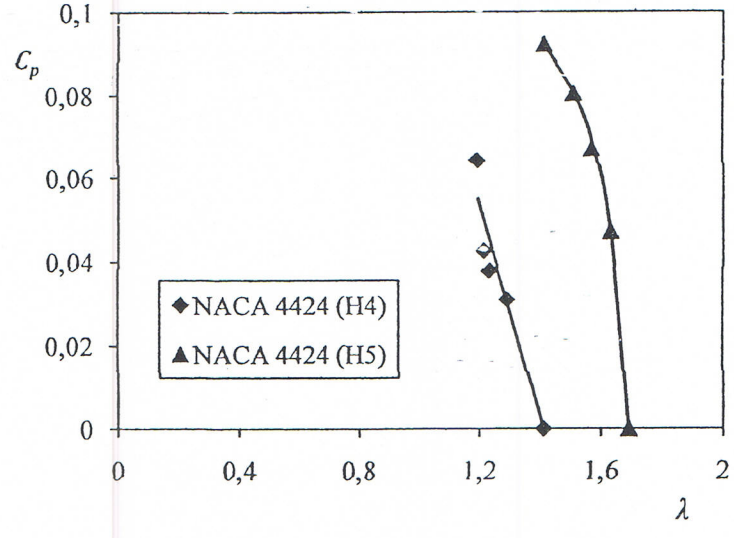
Gambar 5.8 : Koefisien torsi untuk sudu tak-simetris

Efisiensi yang direpresentasikan oleh koefisien daya turbin untuk tiga jenis ketebaian sudu yang digunakan diberikan oleh Gbr. 5.9. Kita lihat pada Gambar bahwa sudu NACA 0015 dan 0020 mempunyai perbedaan koefisien daya yang sangat kecil dan profilnya praktis sama. Kedua sudu tersebut ternyata mempunyai kinerja yang lebih baik dari NACA 0030 yang lebih tebal oleh karena dengan kedua sudu tersebut menghasilkan batasan operasi turbin pada putaran lebih tinggi dan apabila pada kecepatan putar yang sama maka efisiensi lebih tinggi. Untuk NACA 0030 beroperasi pada putaran lebih kecil. Batasan operasi tersebut adalah $1{,}8 < \lambda < 2{,}5$ untuk sudu NACA 0015 dan 0020 serta $1{,}5 < \lambda < 2{,}2$. Semakin tinggi putaran turbin maka akan semakin baik kinerjannya karena turbin pada putaran tinggi akan mengurangi terjadinya *stall* sehingga menaikkan efisiensinya.



Gambar 5.9 : Pengaruh tebal sudu terhadap daya

Gbr. 5.10 memberikan perubahan koefisien daya terhadap *tip speed ratio* untuk geometri sudu tak-simetris NACA 4424 yang mana H4 adalah untuk sudu dipasang dengan bagian sisi lengkung sudu menghadap kedalam poros dan H5 adalah sudu dipasang dengan bagian sisi lengkung sudu menghadap keluar poros. Sudu dengan configurasi H5 mempunyai putaran yang lebih tinggi dan begit pula dengan koefisien daya. Konfigurasi H4 pada kondisi tertentu yaitu kondisi dimana bagian sisi lurus tegak lurus dengan aliran datang maka pada kondisi ini tidak menghasilkan kerja pada sudu dan kecepatan sudu kecil karena kondisi ini gaya yang dihasilkan lebih kecil. Selain itu terhadap aliran datang dan putaran turbin maka *stall* yang terjadi lebih besar dibangdingkan konfigurasi sudu H5.



Gambar 5.10 : Pengaruh bentuk sudu terhadap daya

BAB 6
KESIMPULAN

Studi eksperimental tentang kinerja turbin Darrieus dengan memakai geometri sudu simetris NACA 0015, 0020 dan 0030 maupun tak-simetris NACA 4424 telah dilakukan di saluran irigasi keluar pintu air di dam irigasi sungai kelingi Lubuk Linggau. Pengaruh ketebalan sudu simetris terhadap kinerja turbin sangat kecil antara NACA 0015 dan 0020 oleh karena hasil menunjukkan bahwa kurva koefisien daya praktis sama. Namun apabila tebal dinaikkan dengan memakai NACA 0030 maka pengaruh mulai signifikan terhadap efisiensi turbin. Hal ini disebabkan oleh karena tahanan gesek aliran (*drag*) dan sudu semakin besar. Sebalikknya ketebalan menurun maka sudu semakin tipis dan *drag* semakin kecil. Oleh karena itu sudu seri NACA 0015 s.d 0020 mempunyai kinerja yang sangat baik.

Pemakaian geometri sudu tak-simetris seri dalam hal ini NACA 4424, pemasangan sudu pada rotor turbin mempengaruhi kinerja turbin. Apabila bagian sisi lengkung dari sudu dipasang menghadap kedalam maka efisiensi yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan apabila menghadap keluar dan menghasilkan daerah operasi pada putaran lebih rendah dari menghadap keluar.

Hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai batasan penggunaan jenis sudu pada turbin Darrieus. Oleh karena dalam perancangan haruslah dipilih sudu yang mempunyai efisiensi tinggi dan mempunyai kekuatan yang baik.

DAFTAR PUSTAKA

[1]. Antheaume, S., Maitre, T., Achard, J., 2007, A Innovative Modelling Approarch to Investigate The Efficiency of Cross Flow Water Turbine Farms, *2nd IAHR International Meeting of The Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulics Machinery and Systems*, Scientific Bulletin of The Politechnica University of Timisoara Transaction on Mechanics, Romania.

[2]. Betz, A., 1926, Wind Energy and its Extraction Through Wind Mills, German.

[3]. Chaudry, M. H., 2008, Open Channel Flow, 2nd Edition, Springer Science and Business Media LLC, New York.

[4]. Chesna, A., Dibella, T., Hutchins, T., Kroft, S., Lesica, J., Mahoney, J., 2002, Hydroelectric Power Generator, Department of Mechanical Industrial and Manufacturing Engineering College of Engineering Northeastern University, Boston.

[5]. Da Vinci, L., 2001, Guidebook on the RES Power Generation Technologies, Kane Cres, Zreu., Athens.

[6]. Gorban, N., Gorlov, A, Silantyev, A.M, Valentin, M., 2001, Limits of The Turbine Efficiency for Free Fluid Flow, *Journal of Energy Resources Technology Vol.123 p. 311-317*

[7]. Gorlov, A.M., 2001, Tidal Energy, Northeastern University, Boston.

[8]. Guittet, Linda., Kusulja., Mile., Maitre, Thierry., 2005, Setting up of an Experiment to Test Vertical Axis Water Turbines, Laboratoire des Geophysiques et Industriels, Grenoble.

[9]. Hau, Eric., 2005, Wind Turbine : Fundamental, Technology, Applications, Economics, 2nd Edition, Springer – Verlag Berlin Heidelberg.

[10]. Jeronimo, Z., Imbault, D., Tourabi, A., 2007, Fluid-Structure Interaction and Design of Water Current Turbines 2nd IAHR International Meeting of The Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, Timisoara.

[11]. Lanzafame, R., Messina,M., 2007, Fluid dynamics wind turbine design: Critical analysis, optimization and application of BEM theory, Renewable Energy 32, p. 2291–2305.

[12]. Maryono, A., 2005, Eko-Hidraulik Pembangunan Sungai, Magister Sistem Teknik Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada.

[13]. Munson, B.R., Young, D.F., Okishi, T.H., 2005, Mekanika Fluida Jilid II Edisi 4, Erlangga, Jakarta.

[14]. Prayitno, 2002, Turbin Air, Program Magister Sistem Teknik Konsentrasi Mikrohidro Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.

[15]. The Gorlov Turbine, 1997, Allied Signal Aerospace, Report on independent testing at Michigan University.

[16]. Weimann, P., Muller, G., Senior, J., Review of Current Developments in Low Head and Small Hydropower

[17]. Kirke B.,Lazauskas L.,2008, Variable Pitch Darrieus Water Turbine, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.3 No. 3

[18]. Kyuzuka Y.,2008, An Experimental Study on the Darrieus-Savonius Turbine for the Tidal Current Power Generation, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.3 No. 3

[19]. Claessens M.C, 2006, *The Design and Testing of Airfoils for Application in Small Vertical Axis Wind Turbines,* Master Thesis of Delf University of Technology

[20]. Hilton D.J, 1983, Performance of a Darrieus Water Turbine at Various Solidities, Eight Australasian Fluid Mechanic Conference, University of New Castle

[21]. Mitsuhiro Shiono, Kidsuyuki Suzuki, Sezji Kiho, 2002, *Output Characteristics of Darrieus Water Turbine with Helical Blades for Tidal Current Generations,* Proceedings of The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference Kitakyushu, Japan, May 26–31

[22]. Lain S., Osario C., 2010, Simulation and Evaluation of a Sraight Bladed Darrieus-Type Cross flow Marine Turbine, *Journal of Scientific & Research*, Vol. 69 p.906-912

[23]. Batten W.M.J, Bahaj A.S., Molland A.F., Chaplin J.R, 2006, Hydrodynamics of Marine Current Turbines, *Renewable Energy*, Vol. 31 p. 249–256

[24]. Georgescu S.C, Bernad S.I., Susan Rgisa I., 2007, Numerical Modelling Comparaison Between Airflow and Water Flow within the Achard-Type Turbine, 2nd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in hydraulic Machinery and Systems Timisoara, Romania October 24 – 26.

LAMPIRAN

1. Personalia Penelitian

1. Ketua :
   a. Nama lengkap dan Gelar : Prof. Dr. Ir. Kaprawi Sahim,DEA
   b. Pangkat/Golongan /NIP : Pembina /IV-b/195701181985031004
   c. Jabatan Fungsional : Guru Besar
   d. Bidang Keahlian : Konversi Energi
   e. Waktu disediakan : 12 jam/minggu
   f. Jurusan : Teknik Mesin

2. Anggota 1 :
   a. Nama lengkap dan Gelar : Ir. Firmansyah B.,MT
   b. Pangkat/Golongan /NIP : Pembina / IV-a/195612271988111001
   c. Jabatan Fungsional : Lektor Kepala
   d. Bidang Keahlian : Konversi energi
   e. Waktu disediakan : 6 jam/minggu
   f. Jurusan : Teknik Mesin

3. Anggota 2 :
   a. Nama lengkap dan Gelar : Ir. Dyos Santoso,MT
   b. Pangkat/Golongan /NIP : Penata/III-b/196111122199003100 2
   c. Jabatan Fungsional : Asisten Ahli
   d. Bidang Keahlian : Konversi Energi
   e. Waktu disediakan : 6 jam/minggu
   f. Jurusan : Teknik Mesin

4. Anggota 3 :
   a. Nama lengkap dan Gelar : Barlin,ST,MT
   b. Pangkat/Golongan /NIP : Penata Muda/ III-a/198106302006041001
   c. Jabatan Fungsional : Asisten Ahlin
   d. Bidang Keahlian : Konversi energi
   e. Waktu disediakan : 6 jam/minggu
   f. Jurusan : Teknik Mesin

5. Anggota 4 :
   a. Nama lengkap dan Gelar : Aneka Firdaus,ST,MT
   b. Pangkat/Golongan /NIP : Penata Muda/ III-c/197502261999031001
   c. Jabatan Fungsional : Lektor
   d. Bidang Keahlian : Konversi energi
   e. Waktu disediakan : 6 jam/minggu

f. Jurusan : Teknik Mesin

6. Anggota 5 :
   a. Nama lengkap dan Gelar : Astuti,ST,MT
   b. Pangkat/Golongan /NIP : Penata Muda/ III-c
   c. Jabatan Fungsional : Lektor
   d. Bidang Keahlian : Konversi energi
   e. Waktu disediakan : 6 jam/minggu
   f. Jurusan : Teknik Mesin

2. Riwayat Hidup Ketua Peneliti

- Nama Lengkap : Prof. Dr.-Ir. Kaprawi Sahim, DEA
- Tempat/Tanggal Lahir : Palembang / 18 Januari 1957
- Jenis Kelamin : Laki-Laki
- Agama : Islam
- NIP : 131467176 / 19570118 198503 1 004
- Pekerjaan : Dosen Teknik Mesin Fakultas Teknik UNSRI
- Pangkat/Golongan : Pembina /IVb
- Jabatan Fungsional : Guru Besar Teknik Mesin Fakultas Teknik UNSRI
- Unit Kerja : Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya Jl. Raya Palembang-Prabumulih Km. 32 Indralaya 30662, Kab. Ogan Ilir, Sumsel
- Telp./Fax : (0711) 580272
- Alamat Rumah : Jl. Putri Kembang Dadar No. 53, RT. 52 Bukit Lama, Palembang 30139
- E-mail : kaprawis@yahoo.com

Karya Ilmiah

1. Disain boiler dan kompor sistem konveksi menggunakan energi surya atau briket batubara, Laporan Penelitian, PPE Lemlit Unsri, 1999.
2. Lapisan Batas Aliran Disekitar Suatu Selinder Miring, Jurnal Sains dan Teknologi EMAS. Vol. 17 No.2, Mei 2007, ISSN 0853 - 9723, SK Dikti No. 39/Dikti/ Kep/2004
3. Pengaruh Posisi Pipa Segiempat Dalam Aliran Fluida Terhadap Perpindahan Panas, Jurnal Teknik Mesin, Vol. 9 No.2, Okt. 2007, ISSN 1410-9867, SK Dikti No. 56/ Dikti / Kep/2005
4. Pengaruh Turbo Cyclone Terhadap Aliran Jet, Jurnal Rekayasa Mesin Vo. 7-No. ISSN 1411-6553. Maret 2007
5. Pengaruh Pengarah Pada Orifis Terhadap Lebar Penyebaran Aliran Jet, Jurnal Rekayasa Sriwijaya, No.2, Vol. 16, Juli 2008

6. Pengaruh Jarak Sumber Jet Terhadap Temperatur Dinding Selinder, Jurnal Rekayasa Mesin Sriwijaya, No.2, Vol. 8, ISSN 1411-6553, 2008
7. Pengaruh Throttling Katup Dalam Aliran Pipa Segiempat Terhadap Kerugian Energi, Majalah Ilmiah Sriwijaya Vol. XII No.4, ISSN 0126-4680, Juli 2008
8. Pengaruh Angka Prantdl Terhadap Perpindahan Panas Pada Suatu Benda Bulat, Jurnal Rekayasa Sriwijaya, No.3, Vol. 16, 2008
9. Aliran dalam Pipa Lengkung 90° dengan Radius Kelengkungan yang bervariasi, (dalam proses publikasi), 2009

Pengalaman Seminar

1. Seminar Tekkom '93, Pemanfaatan Teknologi Berbasis Komputer Dalam Menunjang Tahap Tinggal Landas, Univ. IBA, 1993
2. Analisa Eksperimental Tekanan Pada Bidang Miring, Seminar Kenaikan Fungsional, FT Unsri. 1994
3. Pengaruh Ketidak sempurnaan Alat Ukur Elektrokimia terhadap Aliran pada dinding, Seminar SDPF III, DGHE, USAID and JICA, Batam 1994
4. Solusi Persamaan Navier-Stokes dengan metode implisit ; Aplikasi Aliran pada Bidang Miring, Seminar kenaikan Fungsional, FT Unsri, 1996
5. Studi Energi Kinetik Jet Gas simetris Terhadap Sumbu, Seminar on Science and Technology, Unand Padang, 1998
6. Pengaruh Kemiringan Bidang Terhadap Distribusi Kecepatan Aliran, Seminar Kenaikan Fungsional, FT Unsri, 2003.
7. Teknik Pembakaran Serbuk gergaji dengan Metode Tungku Bulat Vertikal, Seminar Nasional Sains & Teknologi, Unila, Lampung, 2008
8. Pengaruh Diameter Cerobong dari Tungku Serbuk Gergaji Terhadap Pembakaran, Seminar Nasional Added Value of Energy Resources (AVOER), FT Unsri Palembang, 2008
9. Pengaruh Kelengkungan Sudu Pompa Sentrifugal Terhadap Drag Gesek, Seminar Nasional Added Value of Energy Resources (AVOER), FT UNSRI Palembang, 2008
10. Karakteristik Aliran Jet Udara keluar dari Orifis dilengkapi Katup, Seminar Kenaikan Fungsional Guru Besar, UNSRI, 2009

Pengalaman Pengabdian kepada Masyarakat

1. Perencanaan dan Pembuatan Alat Penekan Telapak Sepatu, Program Vucer Dikti, 1998
2. Pembuatan Mesin Penekan Telapak Sepatu, Program Vucer Dikti, 1999
3. Penyuluhan Pemanfaatan Briket Batu Bara Sebagai Bahan Bakar pengganti Arang untuk Memenuhi Kebutuhan Home Industri Kecil di Desa Tanjung Pinang Kecamatan Tanjung Batu OKI, LPM Unsri, 2001
4. Penyuluhan Pemeliharaan Kendaraan Bermotor di Desa Sukarami Kecamatan Sungai Rotan Kabupaten Muara Enim, LPM Unsri, 2004
5. Tim Juri pada Lomba Irit Bahan Bakar Motor Honda Kharisma, Teknik Mesin FT UNSRI - PT Astra Internasional Palembang, 2004

6. Tim Juri pada Lomba Irit Bahan Bakar Motor Honda Supra Fit, Teknik Mesin FT UNSRI - PT Astra Internasional Palembang, 2005
7. Penyuluhan Tungku Pembakar Bahan Bakar Briket Batu Bara, LPM Unsri, 2008
8. Penyuluhan Pembakaran Briket Batubara dengan Tungku Divergen untuk Industri Pandai Besi di Desa Mandi Angin kecamatan Indralaya Selatan Ogan Ilir, LPM Unsri, 2008

Palembang, 20 Maret 2011
Yang menerangkan,

Prof. Dr.Ir. Kaprawi,DEA
NIP.195701181985031004

3. Uraian Biaya Penelitian

No.	Jenis kebutuhan	Jumlah	Vol	Satuan	Harga (Rp.)	Total (Rp.)
1	**Persiapan**					
	- ATK		1	paket	2.000.000	2.000.000
2	**Alat Penelitian**					
	- Pembuatan sudu		1	unit	7.000.000	3.000.000
	- Pembuatan kerangka turbin		1	unit	3.000.000	2.400.000
	- Alat ukur (sistem torsi)		1	unit	2.000.000	2.000.000
	- Tachometer,pegas (alat ukur)		1	unit	2.000.000	2.000.000
3	**Transportasi**					
	- Palembang-Lubuk linggau (transport,akomodasi,komsi)		1	paket	2.000.000	2.000.000
3	**Pengolahan data**					
	- Pengetikan		1	KEG	1.000.000	1.000.000
4	**Pelaporan**					

	- Penyusunan Laporan		1	Paket	1.100.000	1.100.000
	- Penggandaan laporan		20	EXP	150.000	1.000.000
5	**Seminar / Publikasi**		2	KEG	1.000.000	2.000.000
6	**Honor**					
	- Peneliti utama	1 org	20	OJ	50.000	1.000.000
	- Peneliti muda	6 org	60	OJ	35.000	2.100.000
	- Pembantu peneliti	1	48	OJ	20.000	400.000
Jumlah total biaya penelitian						**20.000.000**

4. Foto Sudu turbin

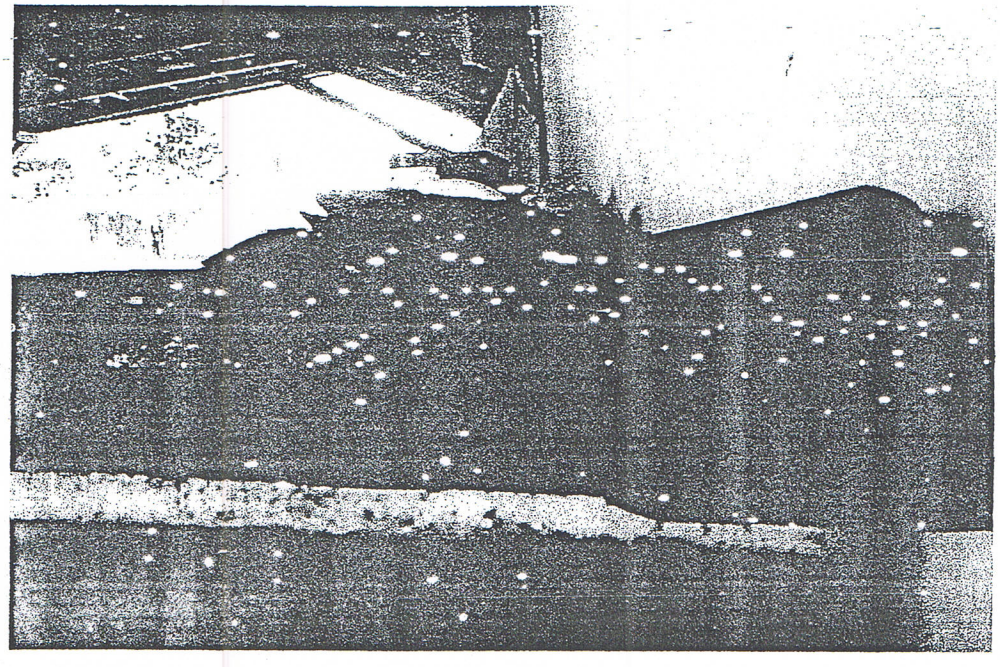


Foto 4.1 : Penampang sudu simetris sebelum dipasang

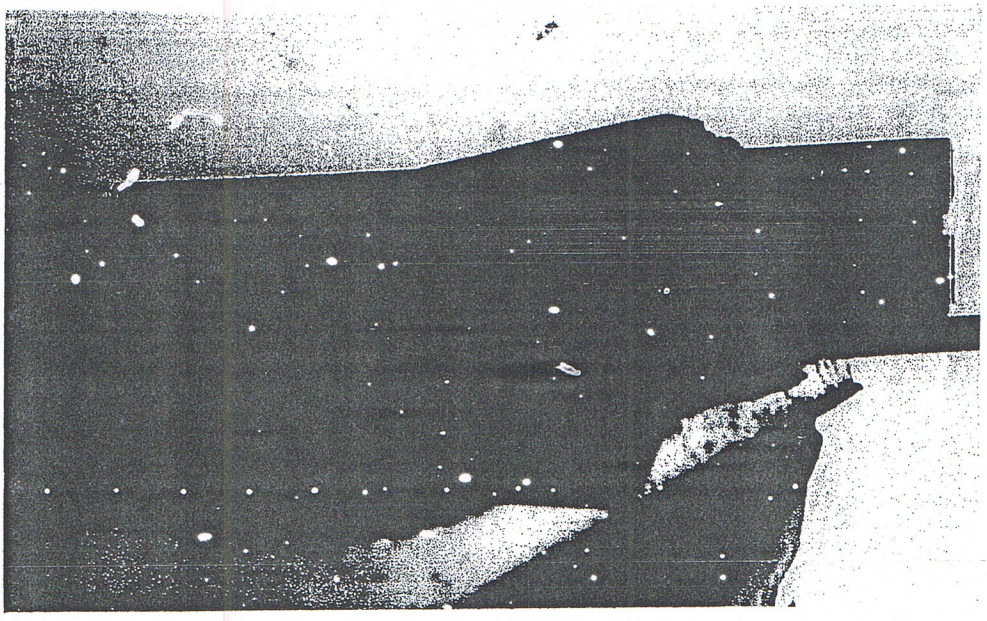


Foto 4.2 : Kumpulan sudu simetris sebelum dipasang

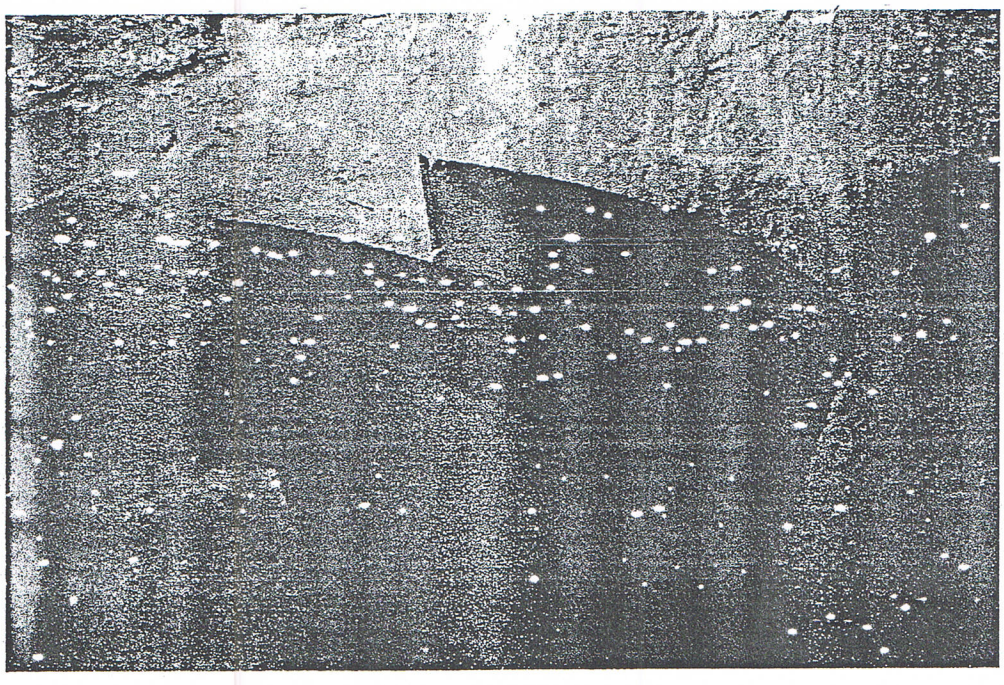


Foto 4.3 : Sudu tak-simetris (NACA 4424)

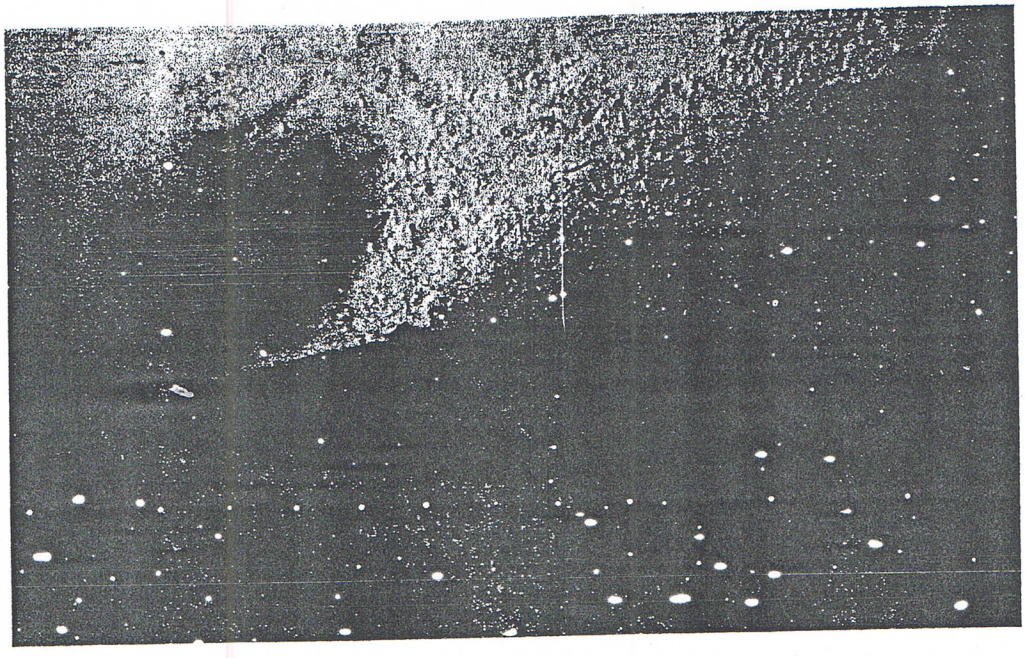


Foto 4.4 : Penampang sudu NACA 4424

5. Foto Pelaksanaan Pengukuran

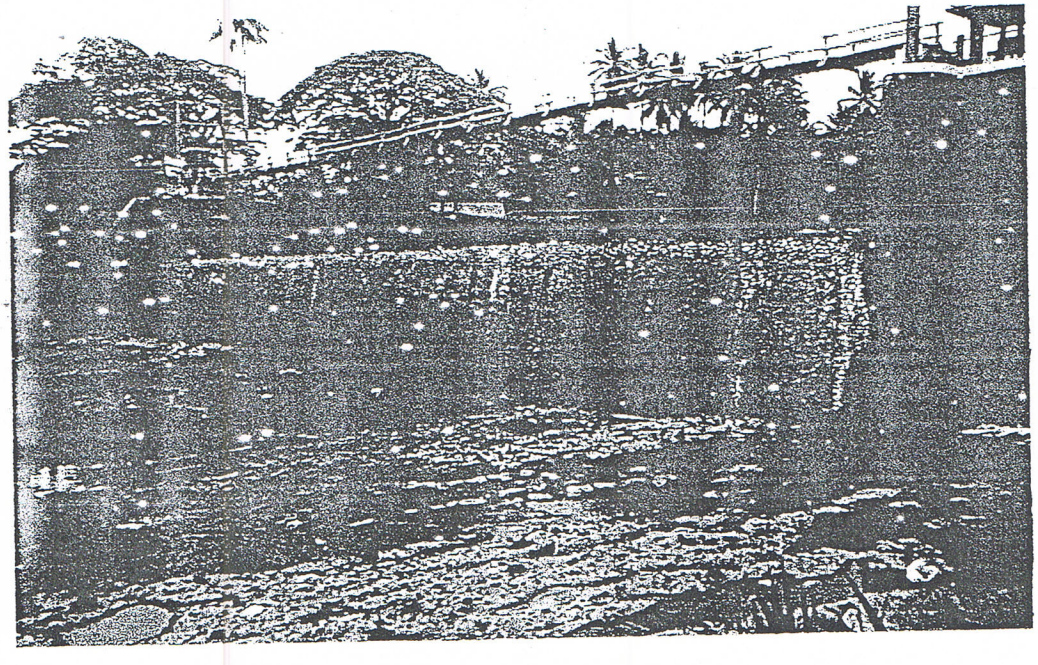


Foto 5.1 : Dam sungai (watervang di Sungai kelingi) di saat kemarau

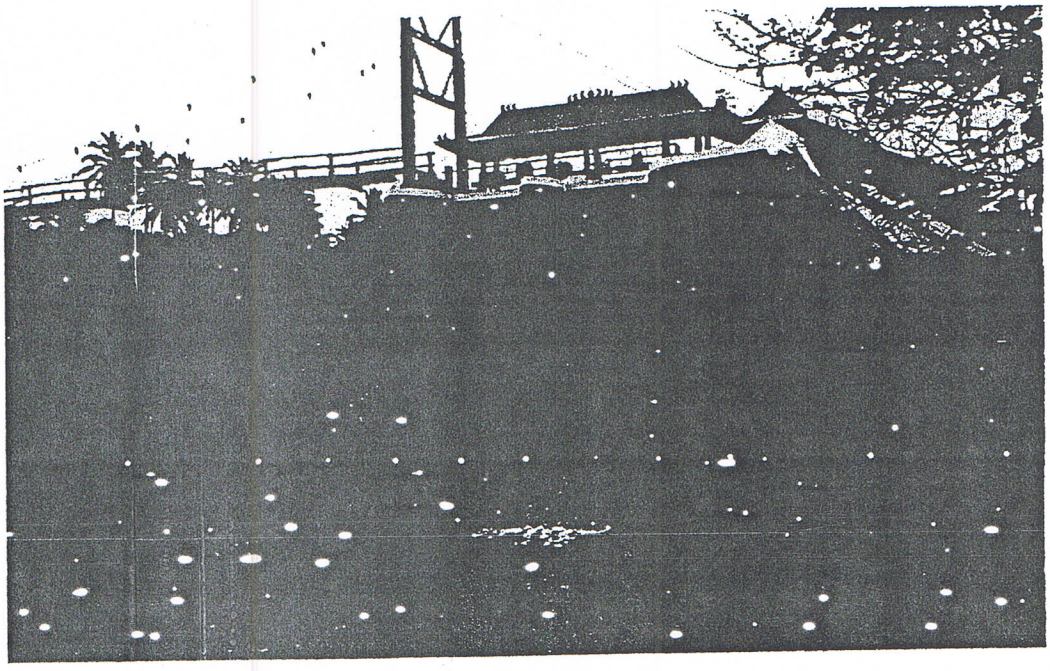


Foto 5.2 : Overflow saat kemarau

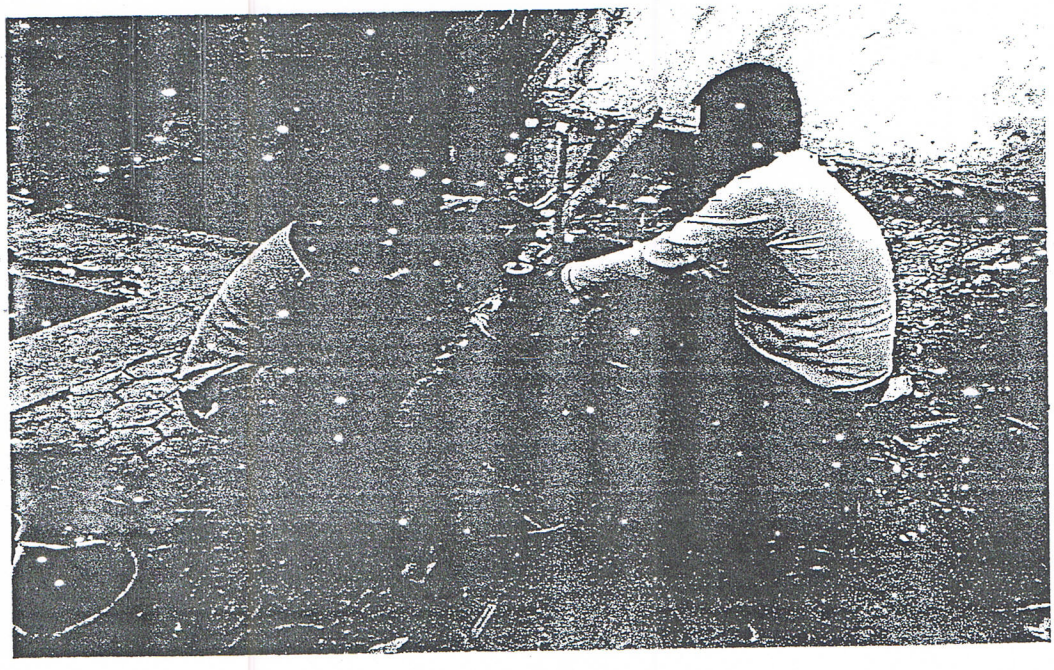


Foto 5.3 : Tim peneliti sedang mempersiapkan turbin

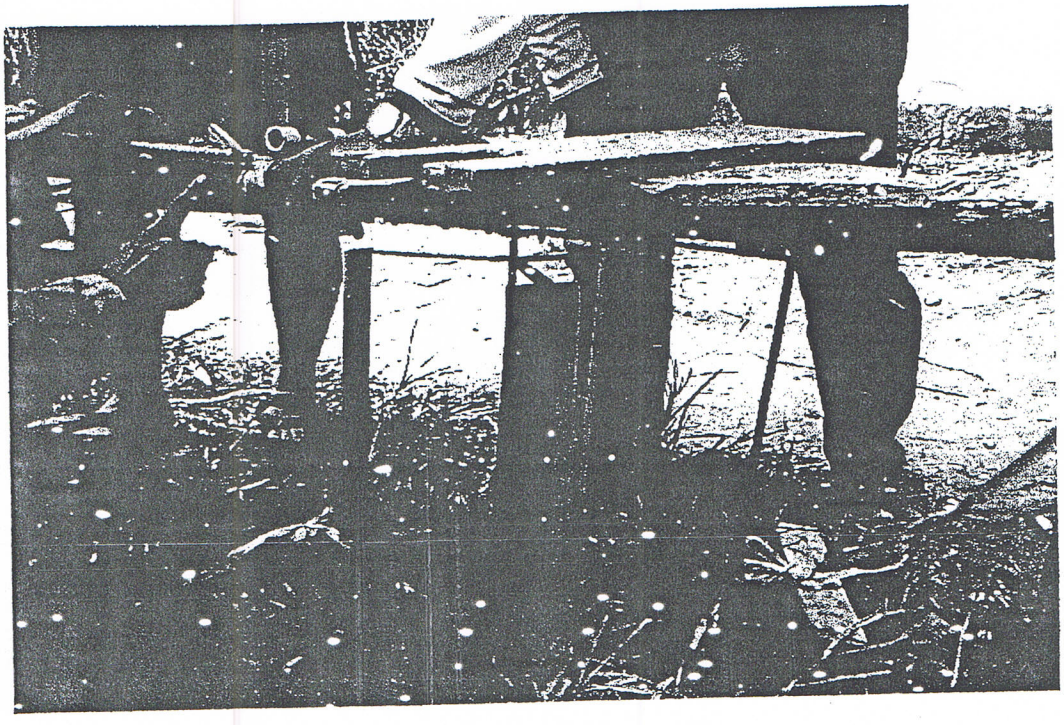


Foto 5.4 : Pemasangan tubular scale

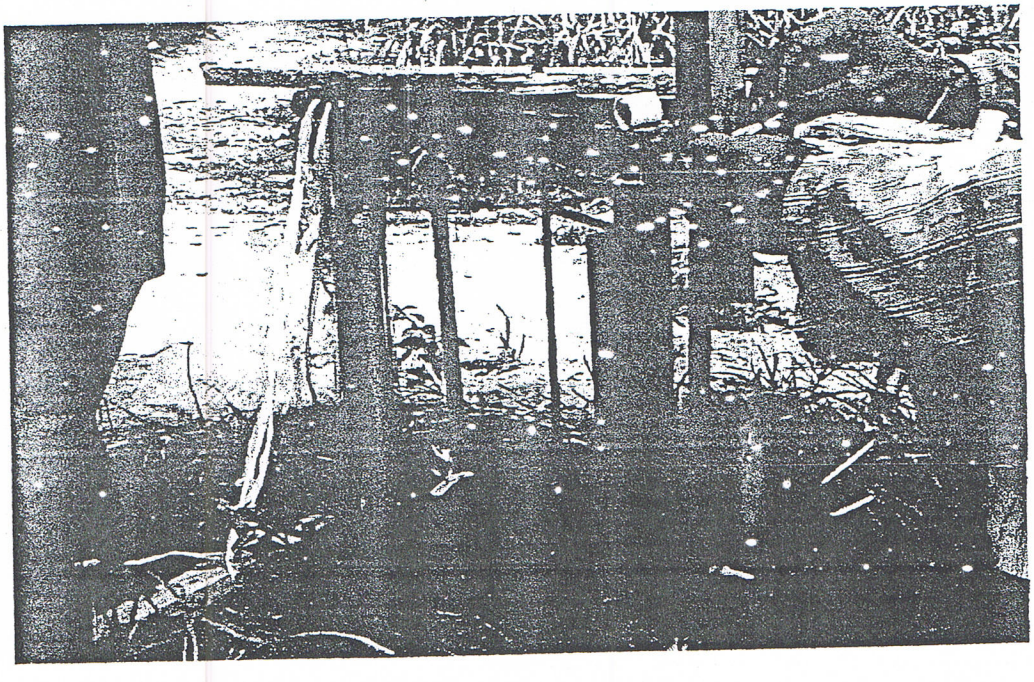


Foto 5.5 : Sudu turbin yang sudah terpasang

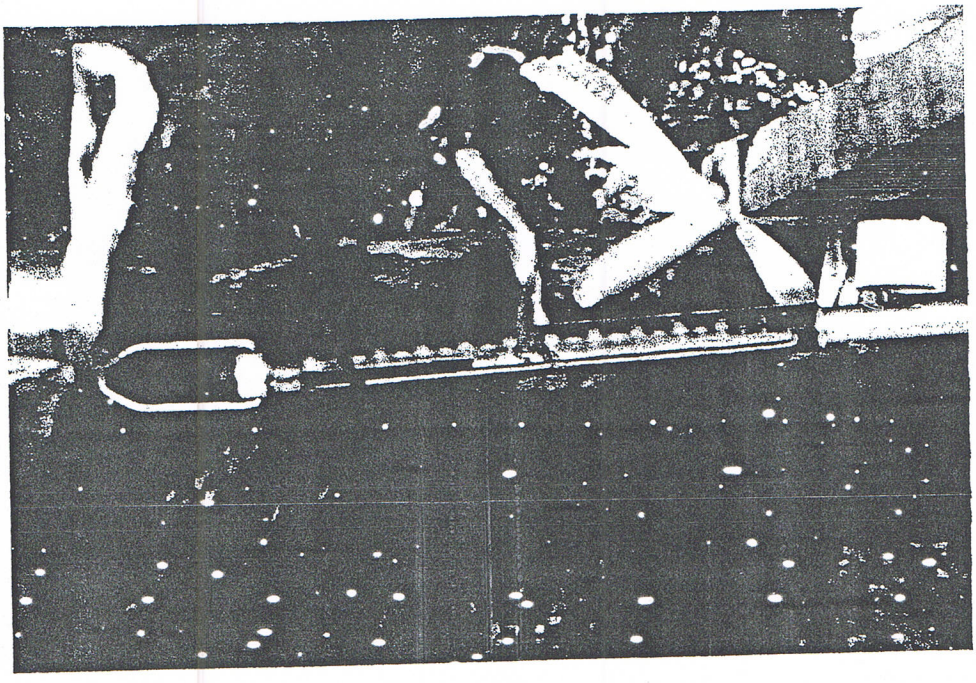


Foto 5.6 : Tubular scale saat bekerja

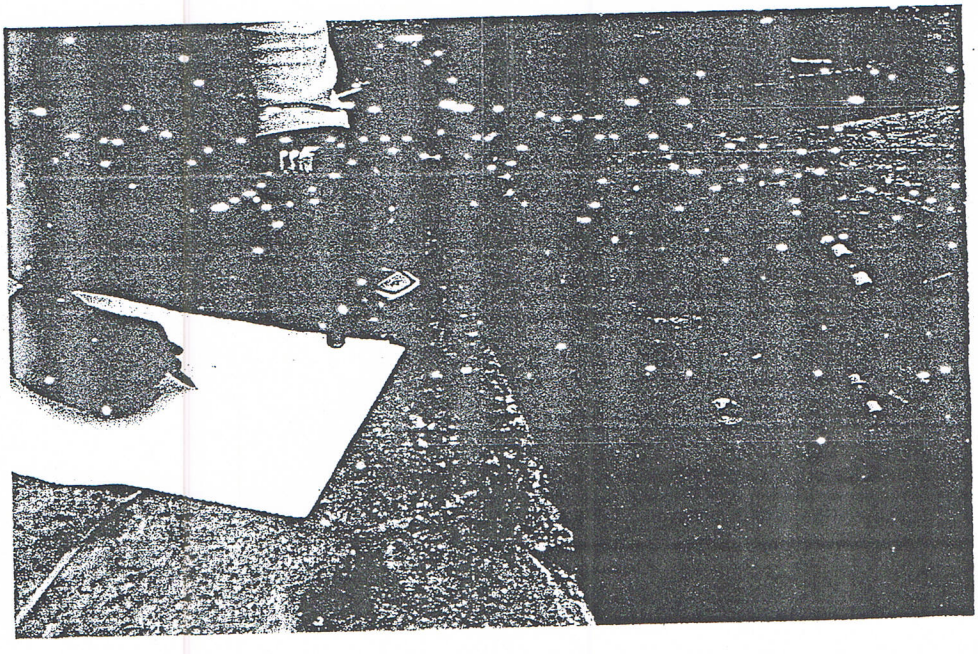


Foto 5.7 : Pencatatan pengukuran

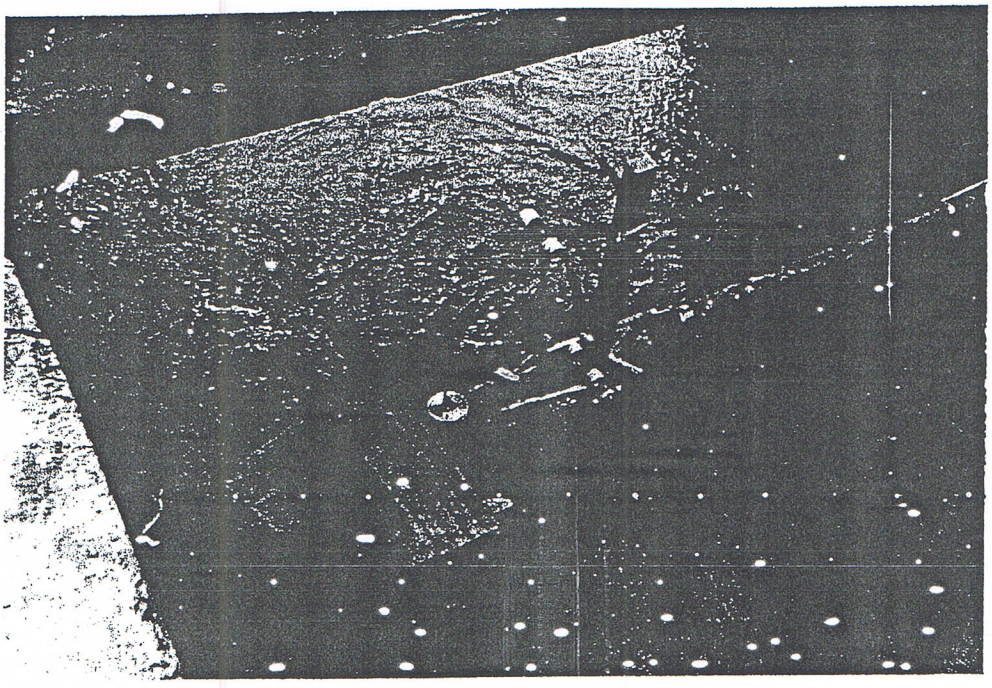


Foto 5.8 : Turbin saat beroperasi

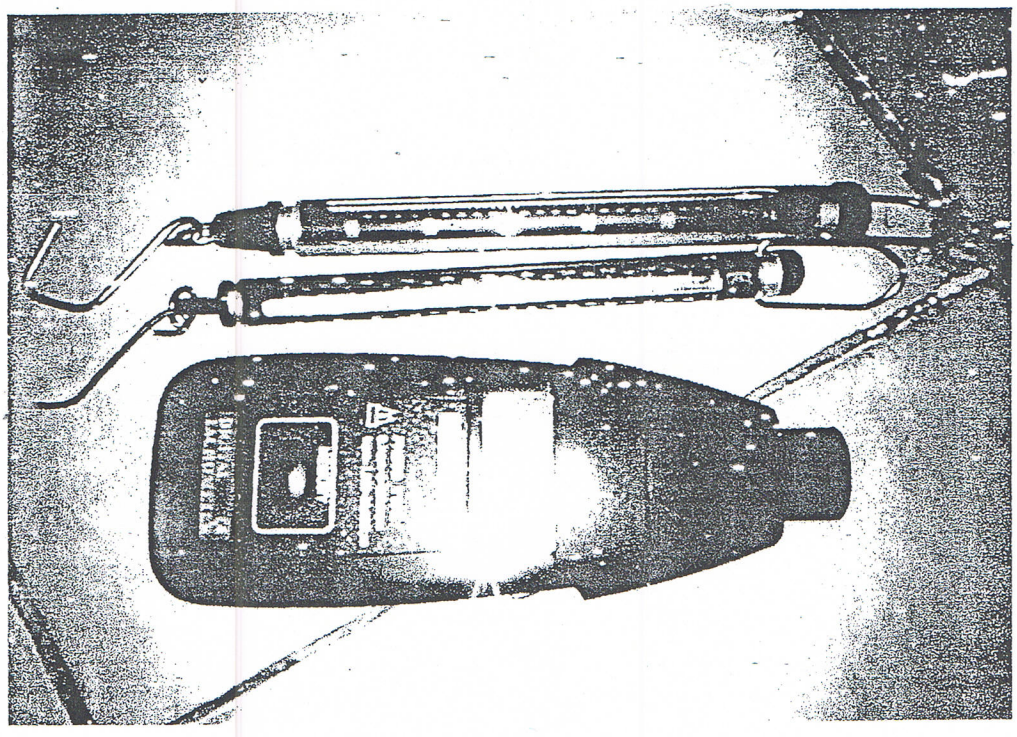


Foto 5.9 : Alat ukur (Tachometer dan Tubular Scale)

6. CD Video pelaksanaan penelitian