

**LAPORAN
AKHIR TAHUN**

PENELITIAN TERAPAN UNGGULAN PERGURUAN TINGGI



**PENGEMBANGAN TEROWONGAN ANGIN RANGKAIAN TERBUKA
DENGAN SISTEM PIV (*PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY*)**

Tahun ke-1 dari rencana 2 tahun

KETUA : Dr. Ismail, S.T., M.T. (NIDN: 0312058001)
ANGGOTA : Dr. Damora Rhakasywi, S.T., M.T. (NIDN: 0327038504)
: Dr. Agri Suwandi, S.T., M.T. (NIDN: 0319028301)

**UNIVERSITAS PANCASILA
OKTOBER 2017**

HALAMAN PENGESAHAN

Judul : Pengembangan terowongan angin rangkaian terbuka dengan sistem PIV (Particle Image Velocimetry)

Peneliti/Pelaksana

Nama Lengkap : Dr ISMAIL, S.T, M.T
Perguruan Tinggi : Universitas Pancasila
NIDN : 0312058001
Jabatan Fungsional : Lektor
Program Studi : Teknik Mesin
Nomor HP : 081383476846
Alamat surel (e-mail) : ismail2k7@gmail.com

Anggota (1)

Nama Lengkap : Dr DAMORA RHAKASYWI S.T, M.T
NIDN : 0327038504
Perguruan Tinggi : Universitas Pancasila

Anggota (2)

Nama Lengkap : Dr AGRI SUWANDI S.T, M.T
NIDN : 0319028301
Perguruan Tinggi : Universitas Pancasila

Institusi Mitra (jika ada)

Nama Institusi Mitra : -
Alamat : -
Penanggung Jawab : -
Tahun Pelaksanaan : Tahun ke 1 dari rencana 2 tahun
Biaya Tahun Berjalan : Rp 150,000,000
Biaya Keseluruhan : Rp 350,425,000

Mengetahui,
Dekan FTUP

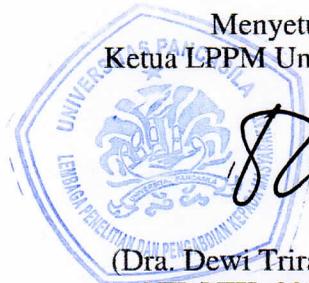


Budhi M. Sujitno
(Dr. Ir. Budhi M. Sujitno, IPM)
NIP/NIK 4314411286

Jakarta Selatan, 25 - 10 - 2017
Ketua,

(Dr ISMAIL, S.T, M.T)
NIP/NIK 431121186

Menyetujui,
Ketua LPPM Univ. Pancasila



Dewi Trirahayu
(Dra. Dewi Trirahayu, MM)
NIP/NIK 0330046201

RINGKASAN

Berdasarkan Rencana Induk Penelitian Universitas Pancasila yang mengacu kepada Rencana Strategis Universitas Pancasila berisikan rencana penelitian unggulan untuk mendukung agenda riset nasional. Pada kesempatan ini, penelitian yang akan dilakukan mengenai pengembangan energi baru dan terbarukan dengan topik riset yang diambil adalah energi angin. Sesuai dengan *road map* pemerintah dalam usaha pengembangan pemanfaatan energi angin sebagai kebijakan dalam bauran energi nasional, pada tahap 2016 – 2025 penguasaan teknologi dan produk turbin angin skala kecil hingga besar sudah harus dipenuhi.

Terbatasnya fasilitas yang ada, masih memberikan permasalahan berupa; sulitnya mengontrol kondisi eksperimen yang diharapkan, tingkat akurasi data hasil pengukuran serta terbatasnya pengamatan terhadap berbagai fenomena sifat aerodinamis yang muncul dari benda uji. Fasilitas peralatan terowongan angin (*wind tunnel*) dengan tipe dan ukuran yang memadai sangat diperlukan untuk mengatasi permasalahan yang ada untuk tujuan pengembangan riset yang lebih mendalam. Pengadaan terowongan angin dalam bentuk yang sudah tersedia di pasar memerlukan biaya modal yang tinggi, sementara itu perancangan, simulasi CFD, pembuatan, dan eksperimen terowongan angin.

Tujuan kegiatan yang diusulkan ini adalah untuk memiliki terowongan angin yang berkemampuan memunculkan berbagai sifat-sifat dasar benda, utamanya berupa turbin angin, misal kecepatan angin, kecepatan putar turbin angin dan sebagainya sesuai prediksi teoritis yang ada, dengan dilengkapi sistem PIV untuk peningkatan akurasi data yang terukur yang mampu digunakan untuk mendukung riset pengembangan turbin angin dan riset aerodinamika lainnya. Program kegiatan ini dirancang bersifat berkelanjutan dengan penekanan fungsional atau mampu digunakan untuk kegiatan riset pada setiap akhir tahap tahun kegiatan. Hasil utama program kegiatan ini adalah diperolehnya secara fisik unit terowongan angin rangkaian terbuka dengan sistem PIV yang memadai untuk dilakukannya penelitian.

Terowongan angin akan dibuat dengan teknik konstruksi empat bagian pokok yaitu bagian penyedia aliran udara berupa kipas angin, bagian seksi diffuser, bagian seksi uji, bagian seksi kontraksi untuk pengkondisi aliran masuk (*calming section*). Keberhasilan program kegiatan ini dapat diindikasikan dari hasil uji performansi terowongan angin yang dibuat dan hasil uji performansi benda uji berupa turbin angin dan ahmad model. Program kegiatan lebih lanjut ditekankan pada peningkatan fasilitas pendukung visualisasi kamera kecepatan tinggi (*high speed camera*), laser, perangkat komputer dan instrumen ukur yang akurat serta logger/data akusisi guna melakukan dan menghasilkan riset yang mendalam dan memadai.

Keyword: Aerodinamika, PIV, sirkuit terbuka, terowongan angin.

PRAKATA

Syukur kehadiran Allah SWT disampaikan, atas kemajuan penelitian ini. Laporan akhir tahun pertama ini diharapkan dapat memberikan gambaran arah kemajuan berikutnya dengan menerima berbagai koreksi maupun penyesuaian yang diperlukan, disesuaikan dengan kondisi lapangan serta memperhitungkan kendala-kendala yang ada.

Seperti yang diketahui, penelitian ini dimaksudkan untuk memperkuat dan memperkaya serta merevitalisasi sarana serta kemampuan sumber daya manusia yang ada di laboratorium, yang diharapkan mampu mendukung kegiatan riset. Secara khusus penelitian bermaksud untuk mewujudkan suatu terowongan angin/*wind tunnel* yang dapat mendukung berbagai kegiatan di lapangan untuk memanfaatkan energi terbarukan angin. Beberapa kendala yang bersifat minor dialami dalam proses kegiatan penelitian ini, namun demikian secara umum kendala tersebut masih dalam batas yang dapat diatasi sesuai dengan dukungan dana yang ada. Diharapkan bahwa penyelesaian dari kegiatan penelitian ini dapat sesuai dengan waktu yang diharapkan.

Kegiatan penelitian dapat berlangsung berkat biaya dari Hibah Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi Kemenristek DIKTI tahun anggaran 2017. Untuk itu peneliti mengucapkan banyak terima kasih.

Jakarta, 25 Oktober 2017

Ketua Peneliti



Dr. Ismail, S.T., M.T

NIDN. 0312058001

DAFTAR ISI

HALAMAN	i
PENGESAHAN	i
RINGKASAN	ii
PRAKATA	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Contraction Chamber	8
2.2. Test Section	10
2.3. Diffuser	10
BAB 3. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN	12
3.1. Tujuan Penelitian	12
3.2. Manfaat Penelitian	12
BAB 4. METODE PENELITIAN	13
BAB 5. HASIL DAN LUARAN YANG DICAPAI	15
BAB 6. RENCANA TAHAPAN BERIKUTNYA	19
BAB 7. KESIMPULAN	21
DAFTAR PUSTAKA	22
LAMPIRAN (bukti luaran yang didapat)	25

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1. Rencana Target Capaian Tahunan	4
Tabel 6.1 Jadwal penelitian yang akan dilakukan dalam 2 (dua) tahun.....	19

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. <i>Roadmap</i> Penelitian.....	6
Gambar 2. 2. Terowongan Angin Rangkaian Terbuka tipe <i>suction</i>	7
Gambar 2. 3. (a) 3D Contraction section sketch; (b) a half 2D Contraction section sketch	9
Gambar 2. 4. <i>Settling Section</i> dengan honeycomb.....	10
Gambar 2. 5. <i>Test Section</i>	10
Gambar 2. 6. Sketch of Diffuser Section : (a) 3D shape (b) A half 2D shape	11
Gambar 2. 7. Terowongan Angin 2D	11
Gambar 4. 1 Bagan Penelitian.....	13
Gambar 5. 1. Desain Terowongan Angin.....	16
Gambar 5. 2. Distribusi kecepatan model RSM untuk $U_0 = 6.6$ m/s	17
Gambar 5. 3. Distribusi tekanan model RSM untuk $U_0 = 6.6$ m/s.....	17
Gambar 5. 4 Turbulence Intensity dari kelima model CFD.....	17
Gambar 5. 5. Produk Terowongan Angin	18

BAB 1. PENDAHULUAN

Berdasarkan Rencana Induk Penelitian Universitas Pancasila yang mengacu kepada Rencana Strategis Universitas Pancasila berisikan rencana penelitian unggulan untuk mendukung agenda riset nasional. Penelitian unggulan tersebut meliputi pengembangan teknologi obat-obatan berbahan alami, pengembangan energi baru dan terbarukan dan pengembangan teknologi transportasi *city car* yang efisien dan ramah lingkungan. Pada kesempatan ini, penelitian yang akan dilakukan mengenai pengembangan energi baru dan terbarukan dengan topik riset yang diambil adalah energi angin.

Sesuai dengan buku putih penelitian, pengembangan dan penerapan ilmu pengetahuan dan teknologi bidang sumber energi baru dan terbarukan untuk mendukung keamanan ketersediaan energi tahun 2025 kemenristek (2006), pemanfaatan energi angin merupakan bagian dari 5% target pembangunan, peran energi lainnya seperti energi batu bara, gas alam, minyak bumi, nuklir dan panas bumi yang akan habis sehingga penyediaan energi keterbaharuan nasional perlu dipertimbangkan untuk dapat dikembangkan. Kebijakan ini sangat beralasan mengingat potensi energi angin Indonesia yang besar dengan jumlah pemanfaatan energi angin yang masih sangat terbatas. Disebutkan di dalam *road map* pengembangan energi angin tahap ketiganya, antara tahun 2016 – 2025, Indonesia harus sudah mampu menguasai teknologi dan produk turbin angin (*wind turbine*) skala kecil, menengah hingga besar.

Langkah ini tentu membutuhkan dukungan kegiatan dan sarana penelitian yang memadai. Berbagai penelitian yang telah dilakukan, Ismail (2009) yang membahas mengenai analisis turbin angin putaran rendah untuk nelayan, Ismail (2012a) yang membahas mengenai perancangan turbin angin tipe darrius H dengan menggunakan banyak sudu, Ismail dkk (2012b) yang membahas mengenai desain alat pengendali pada turbin angin, Ismail dkk (2014a) yang membahas mengenai desain dan eksperimen dari terowongan angin sirkuit terbuka untuk kecepatan rendah, Ismail dkk (2014b) yang membahas mengenai optimasi ladang angin dengan berbagai konfigurasi, Ismail dkk (2015a) yang membahas mengenai modifikasi terowongan angin, Ismail dkk (2015b) yang membahas mengenai pengaruh *wake flow* dan produksi daya pada suatu susunan turbin angin, Ismail dkk (2015c) yang membahas mengenai investigasi pengaruh *wake flow* untuk posisi turbin *non-staggered* dan *staggered* pada suatu ladang angin dan Ismail dkk (2015d) yang membahas mengenai kelayakan ekonomi suatu ladang angin untuk daerah pantai selatan purworejo jawa tengah serta berbagai hasil penelitian yang lain menunjukkan bahwa kebutuhan terowongan angin yang mampu secara skala penuh serta

peralatan pendukung dan instrumen ukur yang memadai untuk menguji performansi suatu bangunan turbin angin bagi pengembangannya adalah sangat penting.

Penelitian lainnya yang berhubungan dengan terowongan angin yaitu Damora (2010) berupa kajian karakteristik sifat transport dan struktur aliran resirkulasi di bawah pengaruh eksitasi eksternal, Damora (2010) pengaruh ukuran zona resirkulasi terhadap sifat transport *separated-reattached flow* dengan eksitasi eksternal, Damora (2009) kajian komputasional dan eksperimental pada aliran vortek untuk melihat karakteristik aliran resirkulasi di bawah pengaruh injeksi gas panas, Damora (2010) simulasi menggunakan CFD (*Computational Fluid Dynamics*) untuk melihat karakteristik aliran vortek yang ditimbulkan akibat pengaruh beda tekanan di sekitar dinding saluran, Damora (2011) karakteristik aliran dan perpindahan panas menggunakan arah aliran *impinging* dengan eksitasi eksternal tiupan jet sintetik *sinusoidal* dan *triangular*, Damora (2011) pengaruh dari gerakan membran jet sintetik secara kontinyu terhadap pendinginan dinding yang panas, Damora (2010) kajian komputasional menggunakan *software* CFD untuk mensimulasikan aliran jet sintetik dengan pengaruh eksitasi eksternal aliran jet sintetik gelombang *triangular*, Damora (2012) pengaruh aliran jet sintetik yang ditimbulkan oleh *cavity design* terhadap efek pendinginan dari dinding yang panas, Damora (2013) karakteristik pendinginan dinding yang panas menggunakan arah aliran menyilang dengan tiupan jet sintetik yang bervariasi, Damora (2012) pendinginan suatu dinding yang panas menggunakan eksitasi eksternal tiupan jet sintetik dengan kombinasi aliran jet *sinusoidal* dan *triangular*.

Terowongan angin (*Wind tunnel*) adalah peralatan yang dapat digunakan untuk melakukan investigasi sifat-sifat aerodinamik dari suatu benda dengan mengalirkan udara yang mempunyai kecepatan terkontrol pada benda tersebut, Anton, Philip S. (2004). Secara komprehensif, pelopor penerbangan *The Wright Brother* membuat terowongan angin ditahun 1901, sejak saat itu berbagai terowongan angin dalam berbagai jenis, ukuran dan keperluan telah dikembangkan, Goethert, Bernhard H., (2007). Laboratorium jurusan teknik mesin universitas pancasila telah memiliki terowongan angin, namun dengan skala yang sangat kecil yang lebih diutamakan hanya untuk keperluan demonstrasi dan pembelajaran mahasiswa S1 yang jauh dari mampu untuk mendukung kegiatan penelitian di bidang pemanfaatan energi angin yang mendalam dan memadai.

Pengadaan terowongan angin dengan spesifikasi memadai tersebut melalui agen penyedia peralatan tentu akan sangat membutuhkan modal finansial yang besar dan tidak mendukung tujuan untuk meningkatkan alih teknologi. Sementara itu pengetahuan dan pengalaman serta dukungan sarana fasilitas *workshop* yang dimiliki jurusan teknik mesin sangatlah memungkinkan untuk melakukan pengembangan terowongan angin semacam itu. Dukungan finansial untuk bahan/materi serta untuk proses pembuatan itu saja sebetulnya yang dibutuhkan.

Tujuan penelitian yang dilakukan adalah untuk pengembangan terowongan angin rangkaian terbuka dengan sistem PIV (*Particle Image Velocimetry*) yang mempunyai skala kemampuan untuk menguji suatu bangunan turbin angin skala kecil hingga menengah dan beberapa model uji lainnya dengan dimensi seksi uji yang memadai. Rancangan terowongan angin yang diusulkan ini diharapkan juga mampu untuk dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan sarana pendukung dan instrumen alat ukur yang lebih akurat guna melakukan riset yang lebih mendalam dan memadai di bidang pemanfaatan energi angin, sehingga diharapkan mampu untuk menunjang kegiatan riset mahasiswa S1 dan S2 serta tenaga pengajar yang lebih memadai. Penguatan unit penyelenggara riset Jurusan Teknik Mesin UP secara spesifik di bidang pengembangan pemanfaatan energi angin akan lebih baik serta mampu menyumbang berbagai solusi kebutuhan nasional dan diharapkan juga internasional dengan hasil penelitian yang lebih maju.

Indikator keberhasilan utama yang ditargetkan pada penelitian ini sebagai berikut :

- Kemampuan terowongan angin untuk memunculkan berbagai sifat-sifat dasar benda uji, utamanya berupa turbin angin, misal kecepatan angin, kecepatan putar turbin angin dan sebagainya sesuai prediksi teoriotis yang ada.
- Perkiraan kemampuan integrasi dengan peralatan pendukung lainnya untuk meningkatkan kemampuan terowongan angin yaitu berupa *high speed camera*, dan visualisasi aliran serta berbagai data akuisisi untuk peningkatan akurasi data yang terukur secara terkalibrasi.
- Tersedianya laporan proses perancangan, pembuatan dan pengujian performansi serta spesifikasi teruji dari peralatan terowongan angin sebagai catatan dasar kemampuan teknologi, khususnya Laboratorium Jurusan Teknik Mesin UP serta acuan untuk pengembangannya.

Program kegiatan yang diusulkan untuk penguatan riset ini dirancang pendekatannya pada penekanan fungsional hasil dari setiap tahap yang diusulkan dalam pembuatan terowongan angin yang disesuaikan dengan dana yang tersedia. Diperkirakan bahwa kemampuan terowongan angin yang diusulkan akan dapat optimum dalam dua tahap, namun dalam setiap tahap yang diusulkan peralatan tersebut sudah harus mampu berfungsi misal untuk proses pembelajaran, penelitian fundamental, dan sebagainya sesuai kelengkapan yang dapat diperoleh dari tiap tahap.

Tahun pertama adalah pembuatan terowongan angin rangkaian terbuka yang mampu untuk melakukan penelitian performansi dasar turbin angin skala kecil hingga menengah dan dapat digunakan untuk membantu proses pembelajaran, tugas mahasiswa S1 serta beberapa penelitian terbatas S2. Tahun kedua adalah pengadaan dan integrasi terowongan angin dengan peralatan pendukung yaitu sistem PIV (*Particle Image Velocimetry*) untuk meningkatkan kemampuannya dalam mendeteksi sifat-sifat spesifik yang muncul dari turbin angin guna pengembangan dan

pendalaman ilmu pengetahuan dan instrumen yang lebih memadai misal *high speed camera*, data akusisi dan sebagainya untuk meningkatkan kemampuan bagi fasilitas penelitian mahasiswa S2 secara penuh. Diharapkan pada akhir tahap ini peralatan sudah mampu untuk mendukung kegiatan penelitian mahasiswa S2 dan kerjasama dengan berbagai lembaga yang terkait dengan pengembangan pemanfaatan energi angin.

Diperkirakan bahwa dengan dorongan berbagai hasil penelitian yang dapat dilakukan menggunakan peralatan ini, makin banyak mahasiswa yang tertarik untuk mendalami pemanfaatan energi angin serta kerjasama kelembagaan guna mendukung pencapaian kemandirian bangsa pada energi. Apabila terowongan angin dengan dimensi yang diusulkan ini dapat dilaksanakan maka berbagai penelitian selain untuk pemanfaatan energi angin juga dapat dilakukan untuk mendukung pengamatan sifat aerodinamis model mobil yang saat ini juga menjadi prioritas penelitian yang dibebankan pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Pancasila.

Tabel 1. 1. Rencana Target Capaian Tahunan

No.	Jenis Luaran		Indikator Capaian	
			TS ¹⁾	TS ²⁾
1	Publikasi Ilmiah ²⁾	Internasional	<i>reviewed</i>	<i>accepted</i>
		Nasional Terakreditasi	tidak ada	tidak ada
2	Pemakalah dalam temu ilmiah ³⁾	Internasional	sudah dilaksanakan	sudah dilaksanakan
		Nasional	tidak ada	tidak ada
3	<i>Invited speaker</i> dalam temu ilmiah	Internasional	tidak ada	tidak ada
		Nasional	tidak ada	tidak ada
4	Visiting Lecturer ⁵⁾	Internasional	tidak ada	tidak ada
5	Hak Kekayaan Intelektual (HKI) ⁶⁾	Paten	tidak ada	tidak ada
		Paten sederhana	tidak ada	terdaftar
		Hak Cipta	tidak ada	tidak ada
		Merek dagang	tidak ada	tidak ada
		Rahasia dagang	tidak ada	tidak ada
		Desain Produk Industri	tidak ada	tidak ada
		Indikasi Geografis	tidak ada	tidak ada
		Perlindungan Varietas Tanaman	tidak ada	tidak ada
6	Teknologi Tepat Guna ⁷⁾	Perlindungan Topografi Sirkuit Terpadu	tidak ada	tidak ada
			tidak ada	tidak ada
7	Model/Purwarupa/Desain/Karya seni/Rekayasa Sosial ⁸⁾		draf	Produk
8	Buku Ajar (ISBN) ⁹⁾		tidak ada	tidak ada
9	Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT) ¹⁰⁾		3	4

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Listrik merupakan kebutuhan energi yang sangat penting dan berpengaruh bagi kesejahteraan masyarakat. Terdapat beberapa jenis pembangkit tenaga listrik, di antaranya adalah pembangkit listrik tenaga fosil, pembangkit listrik tenaga gelombang, pembangkit listrik tenaga angin, pembangkit listrik tenaga surya, dan pembangkit listrik tenaga air. Masing-masing jenis pembangkit listrik tersebut memiliki kekurangan dan kelebihan. Untuk itu, pemilihan jenis pembangkit harus disesuaikan dengan kondisi wilayah yang akan menggunakan fasilitas tersebut, serta ketersediaan dana dan teknologi untuk pembangkit listrik yang akan dibangun.

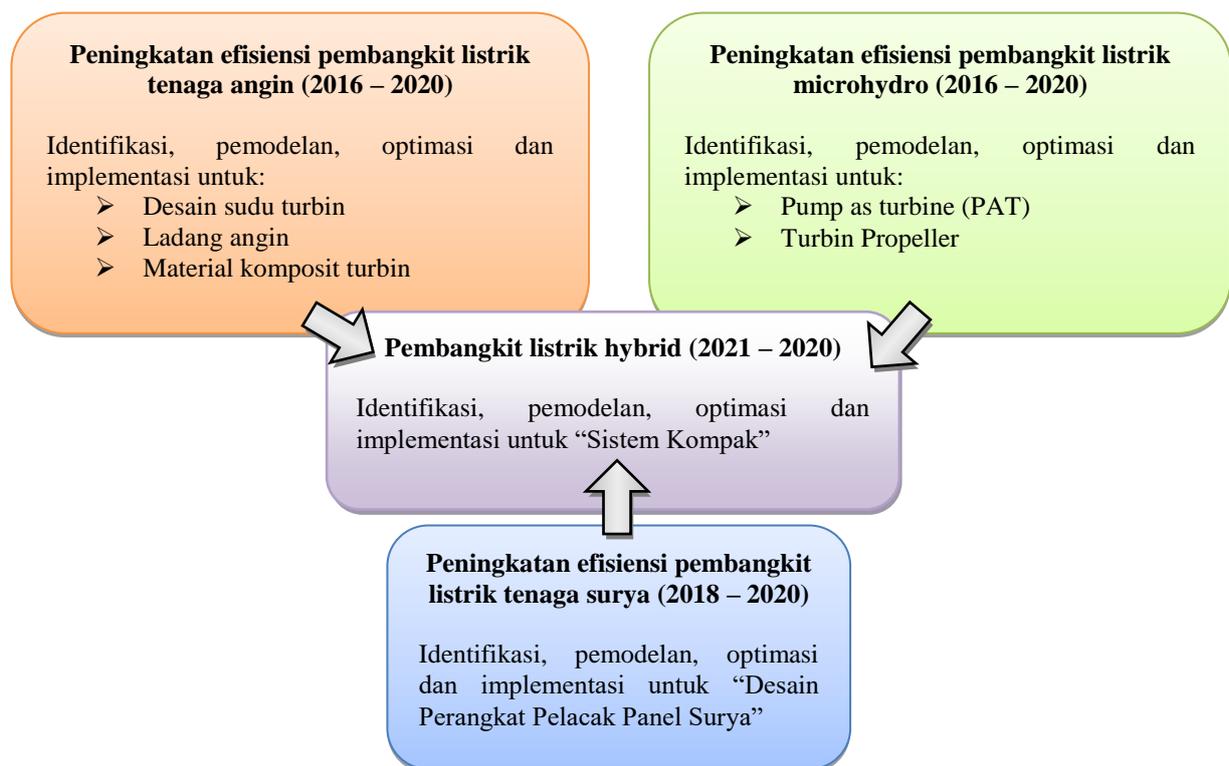
Dengan berkurangnya cadangan minyak bumi, jenis pembangkit listrik yang menggunakan energi terbarukan menjadi salah satu pilihan utama untuk membangkitkan tenaga listrik, diantaranya adalah tenaga air, tenaga angin dan tenaga surya. Namun, ketiga jenis tenaga pembangkit listrik ini sangat tergantung pada kondisi cuaca dan musim yang terjadi. Misalnya, pada malam hari dan waktu tertentu, pembangkit listrik tenaga angin akan mendapatkan energi angin yang besar. Hal ini berbalik untuk siang hari dan musim kemarau, di mana pembangkit listrik tenaga surya akan memiliki efisiensi yang lebih baik dibandingkan tenaga angin. Namun, disisi lain pada saat kondisi musim penghujan, pembangkit listrik tenaga air akan mendapatkan suplai debit air yang besar, sehingga akan meningkatkan efisiensi pembangkit listrik.

Penggabungan dua atau lebih jenis pembangkit tenaga listrik (*hybrid power plant*), misalnya tenaga air dengan tenaga surya, atau tenaga air dengan tenaga angin, akan sangat sesuai untuk Indonesia sebagai negara tropis yang memiliki dua musim. Penelitian mengenai penggabungan dua jenis pembangkit tenaga telah banyak dilakukan, namun belum terdapat analisis dan aplikasi yang spesifik untuk wilayah di Indonesia. Selain itu, masih terdapat beberapa permasalahan yang dihadapi oleh masing-masing jenis pembangkit listrik tenaga air, tenaga angin dan tenaga surya. Untuk itu diperlukan suatu penelitian berkelanjutan tentang pembangkit listrik tenaga terbarukan hingga menghasilkan pembangkit tenaga listrik hibrid, yang sesuai dengan kondisi geografis dan kebutuhan masyarakat di Indonesia. Penelitian ini dilakukan melalui tahapan-tahapan *roadmap* penelitian, seperti pada Gambar 2.1.

Pada penelitian unggulan perguruan tinggi ini, akan dilakukan tahapan penelitian untuk pengembangan terowongan angin rangkaian terbuka dengan sistem PIV (*Particle Image Velocimetry*), sebagai salah satu bagian dari serangkaian tahapan penelitian untuk menghasilkan pembangkit listrik hibrid.

Terowongan angin (*Wind tunnel*) adalah peralatan yang dapat digunakan untuk melakukan investigasi sifat-sifat aerodinamik dari suatu benda dengan mengalirkan udara yang

mempunyai kecepatan terkontrol pada benda tersebut, Anton, Philip S. (2004). Terowongan angin sirkuit terbuka memiliki bagian *Honeycombs*, seksi *contraction*, seksi uji, *diffuser*, dan seksi *fan*, Owen (2008). Owen (2008) mengatakan tidak ada satu pun terowongan angin yang memadai untuk semua kemungkinan pengujian aerodinamis. Secara umum, terowongan angin dapat dibagi menjadi empat kategori utama berdasarkan kecepatannya: subsonik dengan *Mach number* maksimal hingga 0,4; transonik dengan *Mach number* maksimal hingga 1,3 supersonik dengan *Mach number* maksimal 4,0 hingga 5,0; dan hipersonik dengan *Mach number* di atas 5,0.



Gambar 2. 1. Roadmap Penelitian

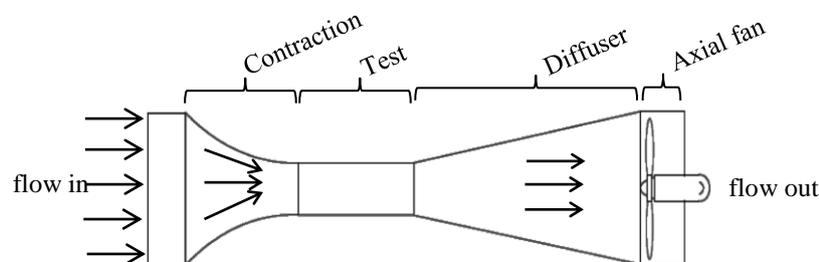
Mayya (2012) mengemukakan bahwa terowongan angin dianggap sebagai perangkat penting untuk menguji kinerja aerodinamis dari bentuk yang berbeda-beda. Fungsinya adalah untuk meniru kecepatan angin yang dikendalikan oleh lingkungan optimal yang menghadapi model dalam waktu yang tidak terbatas untuk mendapatkan hasil eksperimen aerodinamis yang *steady-state*. Performa terowongan angin tergantung pada karakteristik dari aliran udara yang melewati seksi uji.

Kubesh dan Allie (2009) menjelaskan bahwa sebuah terowongan angin harus menghasilkan aliran udara yang seragam sebisa mungkin baik ruang maupun waktu. Beberapa terowongan angin dibuat dengan fungsi yang khusus, seperti terowongan angin untuk uji otomotif, terowongan angin uji jembatan, terowongan angin uji polusi dan sebagainya (Gorlin

dan Slezinger, 1996). Berbagai cara untuk menghasilkan asap untuk tujuan ini telah dikembangkan. Meskipun hal ini tidak sulit untuk merancang generator asap berdurasi singkat, ditemukan masalah tertentu ketika diperlukan asap dengan durasi yang lama dan tingkat produksi yang konstan.

Rehman, Malik, Sarwar, dan Zafar (2011) mendefinisikan turbulensi adalah salah satu subjek yang paling penting berkaitan dengan uji terowongan angin. Pada seksi uji sebuah terowongan angin, tingkat turbulensi dan parameter kualitas aliran lainnya harus dijaga kondisinya semirip mungkin dengan kondisi aliran bebas. Pengukuran turbulensi pada sebuah terowongan angin sangat penting sebagai parameter kualitas aliran.

Wind tunnel memiliki beberapa ruang dengan fungsinya masing-masing. Secara garis besar, masing-masing ruang memiliki fungsi saling berkaitan yaitu untuk menjaga keseragaman aliran udara yang masuk ke dalam ruang uji dan keluar dari ruang uji. Dengan demikian tingkat turbulensi di dalam ruang uji selama belum terdapat benda uji akan dapat dihilangkan. Terciptanya keseragaman aliran angin pada ruang uji merupakan hal terpenting yang hendak diperoleh dalam desain dan konstruksi *wind tunnel* (Hernandez dkk, 2013). Gambar 2.2 memperlihatkan komponen utama dari terowongan angin yang terdiri dari Contraction Section, Test section and Diffuser section. *Contraction section* merupakan bagian terpenting dalam mendesain terowongan angin, aliran yang dihasilkan sangat berpengaruh pada kualitas aliran di *test section*.



Gambar 2. 2. Terowongan Angin Rangkaian Terbuka tipe *suction*

Sebelum melakukan desain secara komprehensif maka perhatian pertama dilakukan dengan menentukan dimensi geometri dan bentuk penampang ruang uji. Dimensi geometri ruang uji tergantung pada obyek penelitian dan tujuan penelitian dengan menggunakan *wind tunnel*. Kualitas hasil pengukuran dari *wind tunnel* sangat bergantung pada kualitas aliran udara pada ruang uji, maka aliran udara pada ruang uji harus seragam, bergerak laminar, dan besar kecepatan udara pada tiap titik adalah konstan (Moonen dkk, 2007). Ukuran geometri ruang uji yang telah diperoleh digunakan untuk merancang dan mendesain ruang yang lain sesuai dengan aturan-aturan yang ada. Walaupun demikian, dalam penelitian ini yang ditentukan pertama

adalah dimensi dan bentuk *inlet*, dan panjang *contraction section*. Bentuk inlet divariasikan dengan dimensi geometri *contraction shape*.

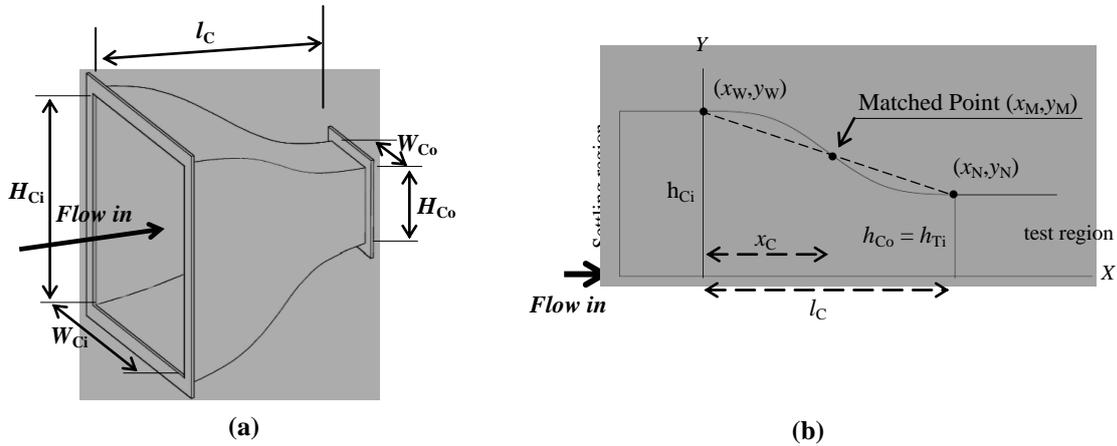
Material untuk konstruksi *wind tunnel* merupakan kombinasi dari acrylic dan logam plat. Acrylic digunakan pada ruang uji, sedangkan pada ruang yang lain menggunakan logam plat dengan ketebalan 3 mm. Maksud penggunaan acrylic pada ruang uji adalah untuk mengurangi gesekan antara aliran angin dengan permukaan acrylic, menghindari potensi bertambahnya *boundary layer*. Acrylic memiliki panas jenis pada temperatur 77 °F adalah 1470 J/Kg-K dan kemungkinan terjadinya deformasi dapat diabaikan karena pada panas jenis tersebut memungkinkan acrylic dapat digunakan hingga temperatur 200 °F (93 °C).

2.1. Contraction Chamber

Kriteria yang hendak dicapai dalam desain ruang kontraksi untuk *open circuit wind tunnel* ini adalah dimensi geometri ruang kontraksi minimal untuk menghemat ruangan dan potensi tebal *boundary layer* yang minimal sehingga dapat menghindari terciptanya *separation flow*. Metode *Non-Parametrik Regression* (NPR) atau metode *surrogate* kemudian dipilih sebagai model sementara untuk mendapatkan ukuran dan dimensi desain yang akan memenuhi kriteria sekaligus mengatasi persoalan tersebut. Setelah mendapatkan desain optimal kemudian titik-titik dimensi diolah hingga memperoleh pola aliran yang seragam di dalam ruang dan mengetahuinya menggunakan metode CFD (Abdelhamed dkk, 2014). Dimensi panjang *nozzle* keluar ruang kontraksi berkorelasi linier terhadap kemungkinan terciptanya *boundary layer*. Selain itu dalam desain ruang kontraksi berupa kemiringan dinding ruang kontraksi yang berbentuk kurva harus diperhatikan karena daerah tersebut menghasilkan daerah *adverse pressure gradient* sehingga akan terbentuk pemisahan *boundary layer* dan kemudian berdampak pada kualitas angin yang masuk ke ruang uji. Ini berarti perlu mengkombinasikan antara pengaruh dari meningkatkan *favorable pressure gradient* dengan mengurangi panjang ruang kontraksi (Morel, 2013).

Salah satu desain ruang kontraksi seperti diperlihatkan pada Gambar 2.3 dengan bentuk kontraksi ditentukan oleh Persamaan 2.1 yang merupakan persamaan polynomial berorde 5 (Bell dan Mehta, 1988). Titik pada sumbu y_C diperoleh dari selisih tinggi masukan ruang kontraksi h_{Ci} terhadap selisih tinggi masukan dengan tinggi keluaran h_{Co} ruang kontraksi sendiri dan rasio antara panjang titik kelengkungan dari input ruang kontraksi x_C dengan panjang ruang kontraksi keseluruhan l_C . Nilai h_{Ci} dan h_{Co} adalah setengah dari tinggi masukan ruang kontraksi dan keluaran ruang kontraksi yakni H_{Ci} dan H_{Co} . Bentuk kontraksi dengan menggunakan polynomial berorde 5 merupakan bentuk yang moderat dibanding orde lain. Polynomial di bawah orde 5 akan menjadikan celah output ruang kontraksi bertambah panjang, sedangkan di atas orde 5 akan

memperpendek panjang output ruang kontraksi. Hal ini tentu akan berpengaruh pada keseragaman aliran yang keluar dari output ruang kontraksi dan memasuki ruang uji.



Gambar 2.3. (a) 3D Contraction section sketch; (b) a half 2D Contraction section sketch

Gambar 2.3b menunjukkan cara dalam menentukan pusat kelengkungan bentuk ruang kontraksi. Kondisi yang diperlukan untuk menentukan polynomial awal adalah koordinat (x_w, y_w) berada pada masukan ruang kontraksi dengan titik x_M, y_M adalah titik pusat kelengkungan. Kondisi tangensial horizontal di titik tersebut (x_M, y_M) , titik di mana garis kontur berpotongan dengan garis lurus yang dianggap sebagai garis kontrol, ditetapkan setengah dari panjang garis kontrol dan sekaligus berpotongan di titik tersebut. Garis kontrol dimulai dari titik awal (x_N, y_N) , dengan kondisi yang sama horizontal tangensial di titik ini, dan berakhir di titik x_w, y_w .

Rumus polynomial yang digunakan untuk menentukan koordinat *contraction* ditunjukkan pada Persamaan 2.1. Kelengkungan ruang kontraksi juga dirancang dengan menggunakan metode *Logarithmic Derivative Profile* (LDP) seperti terlihat pada Persamaan 2.2 yang dikenal juga dengan model Boerger (Rodriquez, 2013).

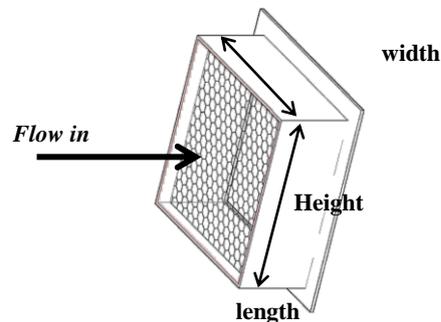
$$y_c = h_{ci} - (h_{ci} - h_{co}) \left[6 \left(\frac{x_c}{l_c} \right)^5 - 15 \left(\frac{x_c}{l_c} \right)^4 + 10 \left(\frac{x_c}{l_c} \right)^3 \right] \quad (2.1)$$

$$y_c = h_{ci} + \frac{(h_{ci} - h_{co})}{l_c} x_c \left[\ln \left(\frac{(h_{ci} - h_{co})}{l_c} x_c \right) - \ln(h_{ci} - h_{co}) + 1 \right] \quad (2.2)$$

Karena bentuk desain yang simetris, maka variabel yang menjadi pengontrol bentuk *contraction chamber* adalah ukuran *inlet*, panjang ruang kontraksi, rasio kontraksi dan kelengkungan *contraction chamber*.

Settling chamber merupakan bagian dari terowongan angin rangkaian terbuka yang diletakkan di awal rangkaian. Ketika membutuhkan aliran udara yang berkualitas tinggi, suatu alat harus dipasang untuk meningkatkan aliran yang seragam dan mengurangi tingkat turbulen

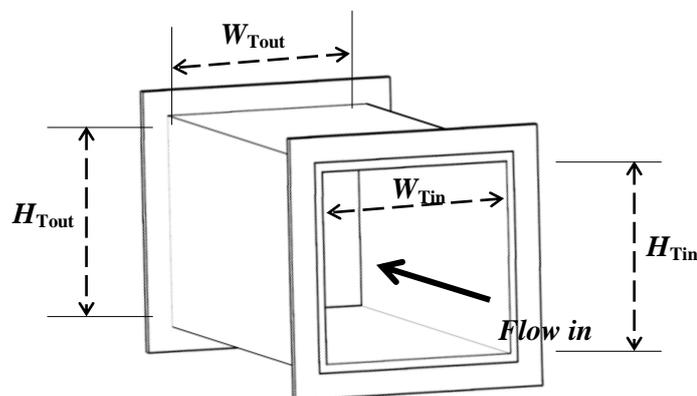
dalam aliran sebelum memasuki bagian *contraction*. Komponen yang dipasang di bagian *settling chamber* yaitu *honeycombs* yang berfungsi untuk meluruskan aliran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Sedangkan konstruksi ruang ini dirangkai dari plat-plat tipis dengan ketebalan 3 mm untuk menjamin kekuatan dan ketahanan struktur ruang.



Gambar 2. 4. *Settling Section* dengan honeycomb

2.2. Test Section

Test section merupakan tempat pengujian suatu benda uji seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Rendahnya tingkat turbulensi aliran udara yang masuk ke *test section* ini sangat dibutuhkan, semakin rendah maka akan semakin bagus dan akurat untuk hasil simulasi dari *test* yang dilakukan. Ukuran untuk *test section* ini tergantung kepada benda uji yang akan diuji di terowongan angin.

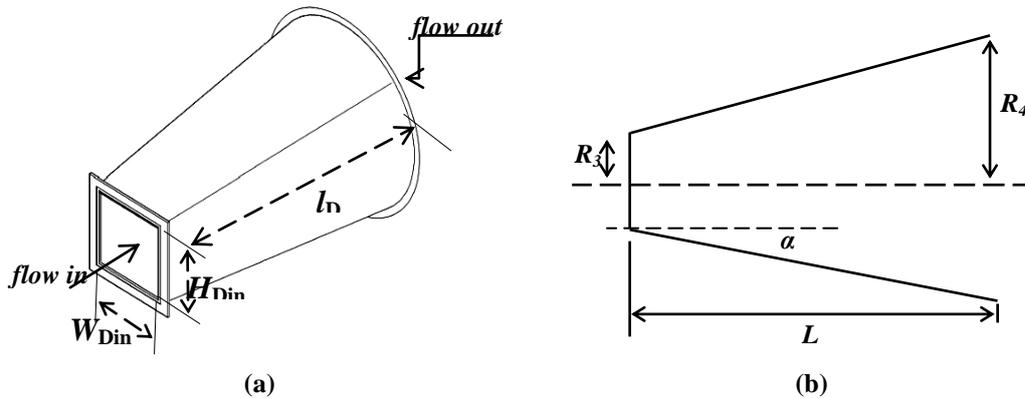


Gambar 2. 5. *Test Section*

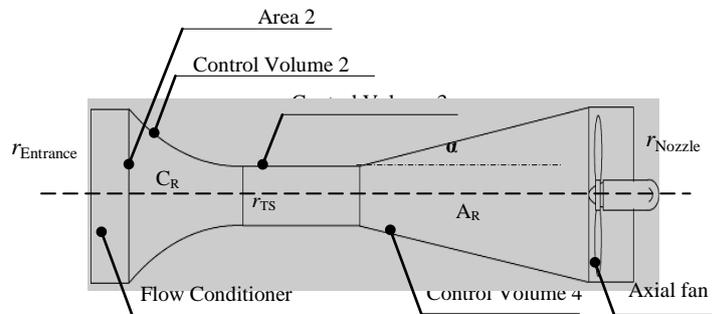
2.3. Diffuser

Fungsi utama dari *diffuser* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6a yaitu untuk memulihkan tekanan stastis dalam rangka meningkatkan efisiensi dan menutup dari aliran sirkuit. Letak dari *diffuser* ini berada setelah *test section* dan di bagian akhir dari *diffuser* akan diletakkan *axial fan*. Bila panjang dan diameter dari seksi uji diberikan berdasarkan desain kebutuhan, maka panjang dari seksi difuser tergantung dari dua variabel yaitu variabel pertama

adalah diameter seksi uji dan yang kedua adalah daerah *Area Ratio* (AR) dari seksi difuser dan ditetapkan oleh perancang. Oleh karena itu diperoleh panjang untuk seksi difuser mengikuti formulasi yang diperlihatkan pada Gambar 2.6b.



Gambar 2. 6. Sketch of Diffuser Section : (a) 3D shape (b) A half 2D shape



Gambar 2. 7. Terowongan Angin 2D

Area Ratio (AR) adalah perbandingan luas *inlet diffuser* atau *outlet test section* dengan *outlet diffuser* yang ditunjukkan pada Persamaan 2.3. Nilai AR ditentukan oleh perancang sebagai variabel bebas dan ekuivalen dengan sudut kemiringan pada *diffuser* (θ), dengan AR merupakan perbandingan luas area *inlet* dan *outlet diffuser*, A_3 adalah luas area 3 (m^2), dan A_4 adalah luas area 4 (m^2).

$$AR = \frac{A_4}{A_3} \quad (2.3)$$

Dengan menetapkan sudut kerucut setara untuk *nozzle diffuser*, panjang *diffuser* dapat dihitung berdasarkan Gambar 6b dan dihitung berdasarkan Persamaan 2.4, dengan L adalah Panjang *diffuser* (m), R_4 adalah jari-jari *outlet diffuser* (m), R_3 adalah Jari-jari *inlet diffuser* (m), dan θ sudut kemiringan *diffuser* ($^\circ$).

$$L = \frac{R_4 - R_3}{\tan \alpha} \quad (2.4)$$

BAB 3. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

3.1. Tujuan Penelitian

Selain untuk mendorong percepatan capaian rencana strategis penelitian Universitas Pancasila untuk menjadi pusat unggulan, pada penelitian ini memiliki tujuan khusus yaitu:

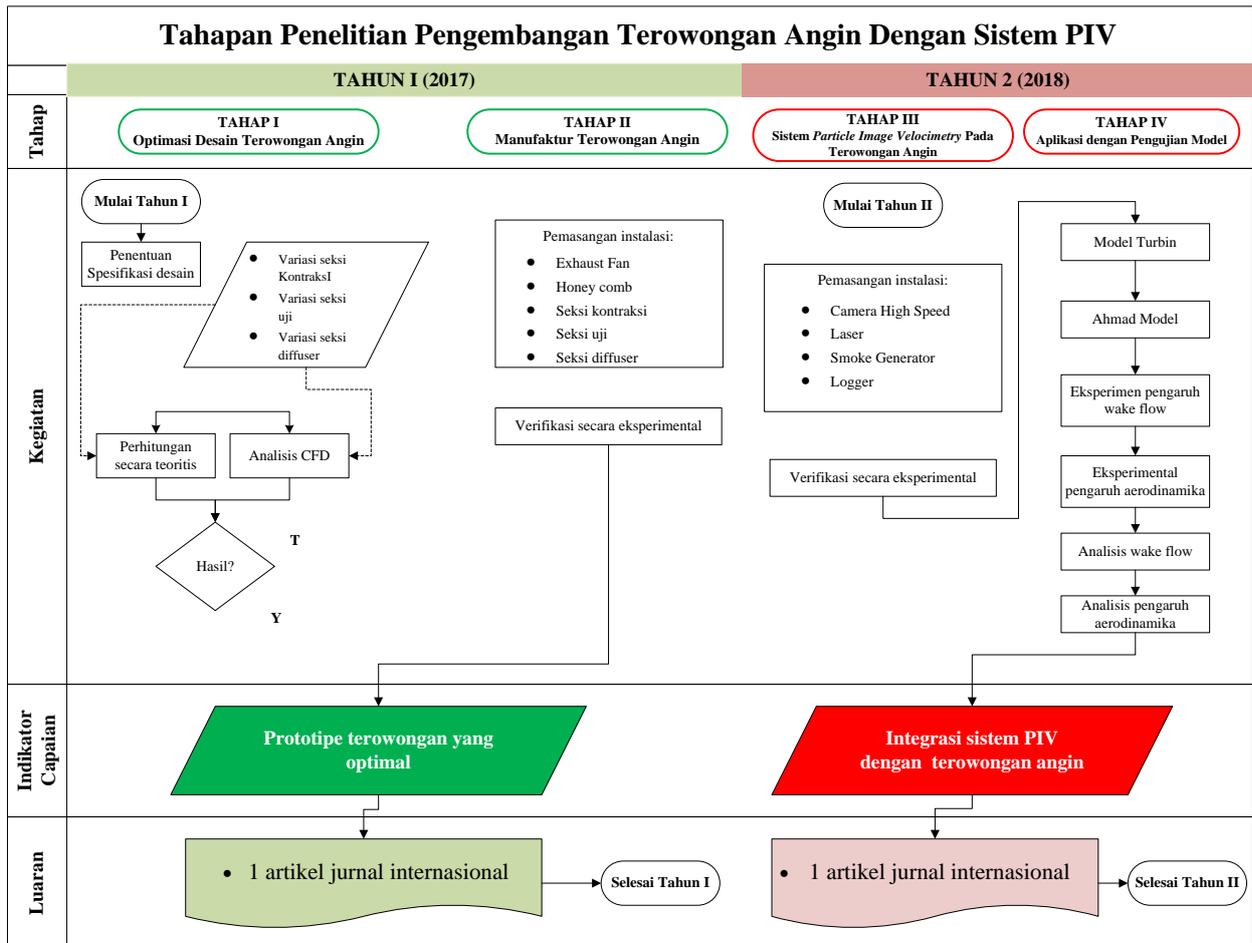
1. Penyelenggaraan pembelajaran terutama S1
2. Aktifitas penelitian bagi S2
3. Pengembangan teknologi pemanfaatan energi angin
4. Memiliki terowongan angin yang berkemampuan memunculkan berbagai sifat-sifat dasar benda, utamanya berupa turbin angin, misal kecepatan angin, kecepatan putar turbin angin dan sebagainya sesuai prediksi teoritis yang ada.
5. Terowongan angin berkemampuan terintegrasi untuk peningkatan akurasi data yang terukur.
6. Dijadikan sarana kerjasama dengan berbagai lembaga yang terkait dengan pengembangan pemanfaatan energi angin.

3.2. Manfaat Penelitian

Manfaat usulan program ini adalah untuk membuat salah satu peralatan utama/vital dalam kegiatan penelitian pengembangan pemanfaatan energi angin yaitu terowongan angin (*wind tunnel*) dengan skala dan peralatan pendukung dan instrumen yang memadai sebagai langkah awal untuk mengatasi permasalahan. Permasalahan yang dimaksud adalah sulitnya mengontrol kondisi percobaan/*boundary* yang diperlukan pada penelitian, akurasi data hasil pengukuran, dan pengamatan terhadap fenomena baru yang diperkirakan secara teori akan muncul dari kondisi percobaan yang dilakukan.

BAB 4. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan pada penelitian ini meliputi metode perhitungan teoritis berbantuan perangkat MathCAD, metode numerik dengan menggunakan perangkat lunak Ansys dan SolidWorks, dan pengujian eksperimen sebagai verifikasi dan validasi yang semuanya dilakukan di Universitas Pancasila. Adapun metode dan tahapan penelitian adalah seperti diilustrasikan pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Bagan Penelitian

Untuk mengembangkan pembangkit listrik tenaga angin dengan efisiensi yang lebih baik dan dapat diimplementasikan secara nyata di Indonesia, maka penelitian ini akan dilakukan dalam empat tahapan pada dua tahun, yaitu:

Tahun I

Tahap I. Optimasi Desain Terowongan Angin

Pada tahap ini akan dilakukan inventarisasi optimasi desain terowongan angin yang telah dipublikasikan oleh peneliti lainnya. Optimasi tersebut akan diklasifikasikan berdasarkan metode

estimasi yang digunakan, yaitu metode teoritis, metode numerik, atau kombinasi dari metode-metode tersebut. Masing-masing metode akan dimodelkan menggunakan software, sehingga akan mempermudah proses perhitungan dan estimasi hasil yang diperoleh.

Selanjutnya, masing-masing metode akan digunakan untuk menentukan dan memprediksi desain terowongan angin sesuai dengan kriteria desain yang akan ditetapkan pada riset ini. Kriteria desain akan disesuaikan dengan kondisi laboratorium dan riset yang akan dilakukan pada terowongan angin. Parameter seperti kecepatan, intensitas turbulen, dimensi geometri tiap-tiap seksi terowongan angin akan diperhitungkan, sehingga didapatkan terowongan angin yang optimal untuk dijadikan fasilitas pengujian.

Tahap II Manufaktur Terowongan Angin

Dimensi, bentuk geometri, material dan proses manufaktur dari terowongan angin akan sangat mempengaruhi kinerja dari terowongan untuk mendistribusikan kecepatan angin di seksi uji. Untuk itu, pada tahap ini akan dilakukan manufaktur dari desain terowongan angin yang paling optimal, sesuai dengan desain terowongan angin yang telah dioptimasi pada tahap I.

Tahun II

Tahap III Sistem *Particle Image Velocimetry* Pada Terowongan Angin

Pada tahap ini akan dilakukan penambahan sistem *particle image velocimetry* (PIV) agar mendapatkan data hasil pengukuran yang lebih akurat dan visualisasi aliran yang lebih baik. Selain itu, sistem PIV ini juga dapat mengontrol kondisi percobaan/boundary yang diperlukan pada penelitian.

Tahap IV Aplikasi dengan Pengujian Model Turbin Angin

Pada tahap ini akan dilakukan pengujian pada dua model benda uji. Benda uji yang akan dilakukan pengujian adalah performansi dari model turbin angin dan pengujian yang dilakukan pada susunan model turbin angin ini untuk menganalisis pengaruh turbin angin upwind terhadap turbin angin downwind.

BAB 5. HASIL DAN LUARAN YANG DICAPAI

Hasil dan luaran yang dicapai di dalam penelitian ini terdiri dari publikasi ilmiah pada jurnal internasional, pemakalah dalam temu ilmiah internasional, desain dan produk. Hasil yang dicapai pada laporan kemajuan 70% ini adalah:

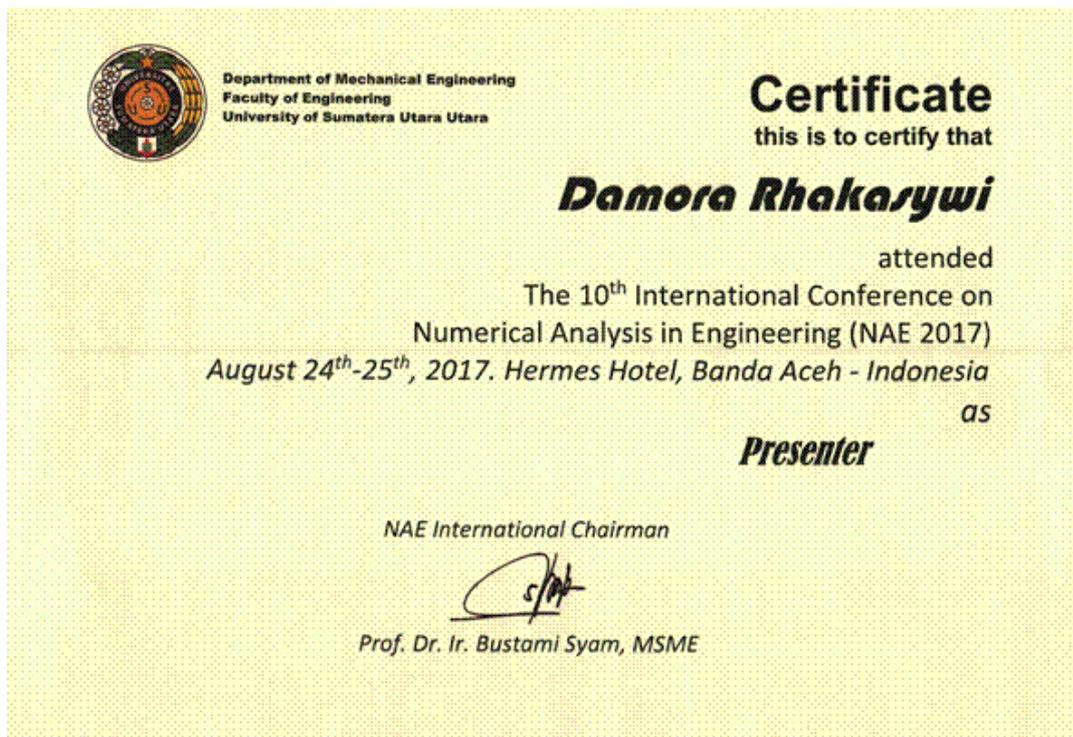
1. Pulikasi ilmiah pada jurnal internasional yaitu submit artikel ilmiah ke jurnal “International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering” (SJR → Q3) terindek scopus, dengan status progress *accepted*. Judul artikel “ Optimization design of open circuit wind tunnel suction type”.



Manuscript Information

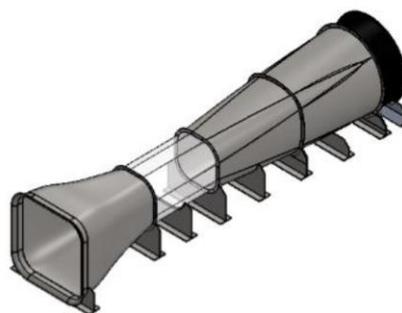
Journal Name:	International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME / IJENS	
ISSN:	ISSN: 2077-124X (Online) 2227-2771 (Print)	
Manuscript Code:	174005-3838 IJMME / IJENS	
Status:	Accept	
Authors:	Ismail*, Jehanis John, Wina Libyawati, Damara Bhakasywi, Agri Sewardi, Priska Alfatri Hendrayanto	
Manuscript Title:	Optimization Design of Open Circuit Wind Tunnel Suction Type	
Abstract:	This study presents optimize design of open circuit wind tunnel suction type based on the cross section shape variation, whilst the specification of the axial fan is set at the debit of 8.75 m ³ /s and the diameter of 1.250 m. TEA (Task Episode Accumulation) and Computational Fluid Dynamic (with Ansys 15.0 version) applied in this study to determine the optimum design. The outcome of wind tunnel design variation 6 has the highest performance among others design. Variation 6 has a length of 5.015 m, speed of 15.0 m/s, Reynolds number of 8.1 x 10 ⁵ , turbulence intensity ranging between 10.25-10.75%, and the specimen must be placed in the middle of plane III and plane III in order to form uniformity in flow.	
Pages:	11	
Tables:	02	
Figures:	17	
Color Figures:	06	
Journal Volume:	17	
Journal Issue:	05	
SUMMARY OF REVIEWERS COMMENTS		
Originality: Accept	Technical Quality: Accept	Significance: Good
Presentation: Accept	References: Accept	Improve English: Yes
Technical Detail: Accept	Need More Figures: Can be	Improve Figures: Yes
Introduction is Adequate: Yes	Improved Critical Discussion: Yes	Technical Accuracy: Accept
Problem Statement & Objective is Clear: Yes		Need More References: Yes
Need More Experimental Results: Yes		Need Comparative Evaluation: Yes
Significance & Broader Impacts: Accept		Implication for Industrial Practice: Accept
Reviewer's Confidence: Accept		
Overall Rating: Accept with Minor Revision		
<p>Technical Comments Summary: Paper is well written. Authors have worked on wind tunnel design optimization. Authors have developed simulation. The design details are well presented. Wind tunnel design is area which is being researched and investigated for different industries. Therefore authors are recommended to share their vision for carrying out this research. What were the specific reasons for conducting this research? What particular problem authors have taken to design this wind tunnel design? Finally what is the significance of this research? These are different questions that authors are recommended to write about in the paper. Plagiarism Report is also attached. IJENS Support Staff did initial formatting on behalf of authors so that author(s) can revise their paper easily and send revised formatted paper. Also IJENS Support Staff provide services to improve remaining errors (including formatting errors) on behalf of authors before publication. Overall the paper is accepted with Minor Revision for publication in coming issue of journal.</p> <p>Please submit only the MS Word file along with bank receipt so that we can improve the remaining errors. Also provide physical address alongwith telephone number for hard copy (+CD) distribution.</p>		

2. Pemakalah dalam temu ilmiah internasional yaitu The 10th International Conference on Numerical Analysis in Engineering (NAE-2017), yang dilaksanakan pada tanggal 24-25 Agustus 2017. Judul artikel “Analysis of subsonics wind tunnel with variation shape rectangular and octagonal on test section”. Artikel akan dipublikasikan di **Open Access Material Science and Engineering (MSE)** yang merupakan bagian dari IOP Conference Series dan terindeks Scopus & Thomson Reuters.



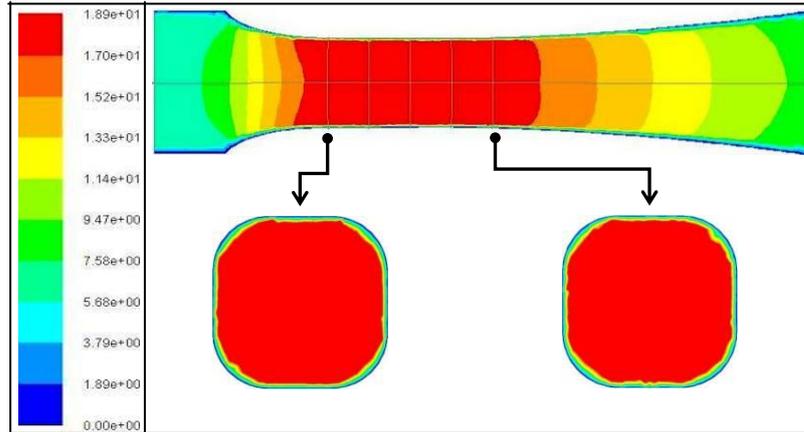
3. Progress dari desain dan produk terowongan angin:

Desain:

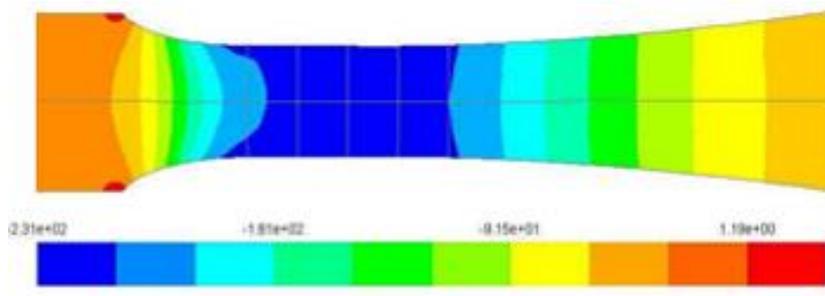


Gambar 5. 1. Desain Terowongan Angin

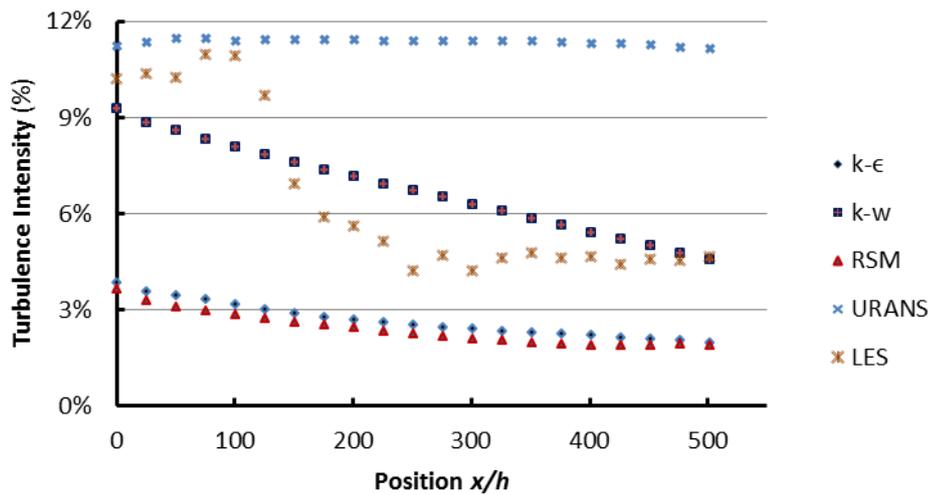
Simulasi CFD:



Gambar 5. 2. Distribusi kecepatan model RSM untuk $U_0 = 6.6$ m/s



Gambar 5. 3. Distribusi tekanan model RSM untuk $U_0 = 6.6$ m/s



Gambar 5. 4 Turbulence Intensity dari kelima model CFD



(a) Panel Listrik



(b) Exhaust Fan



(c) Seksi Kontraksi



(d) Seksi Diffuser



(e) Seksi Uji



(f) Assembling Terowongan Angin



(g) Terowongan Angin

Gambar 5. 5. Produk Terowongan Angin

Rencana tahapan berikutnya yaitu pada tahun kedua terdiri dari 2 (dua) tahapan yaitu:

Tahap I Sistem *Particle Image Velocimetry* Pada Terowongan Angin

Pada tahap ini akan dilakukan penambahan sistem *particle image velocimetry* (PIV) agar mendapatkan data hasil pengukuran yang lebih akurat dan visualisasi aliran yang lebih baik. Selain itu, sistem PIV ini juga dapat mengontrol kondisi percobaan/boundary yang diperlukan pada penelitian.

Tahap II Aplikasi dengan Pengujian Model Turbin Angin

Pada tahap ini akan dilakukan pengujian pada dua model benda uji. Benda uji yang akan dilakukan pengujian adalah performansi dari model turbin angin dan pengujian yang dilakukan pada susunan model turbin angin ini untuk menganalisis pengaruh turbin angin upwind terhadap turbin angin downwind.

Apabila tahapan berikutnya dapat dilakukan maka kemampuan utuh dari terowongan angin sebagaimana dirancang dapat diwujudkan.

BAB 7. KESIMPULAN

Dari hasil pembahasan dapat disimpulkan bahwa:

1. Rancang bangun terowongan angin rangkaian terbuka tipe *suckdown* memiliki spesifikasi sebagai berikut :
 - a. Axial fan memiliki spesifikasi daya 5,5 kW, 960 Rpm, 3 *phase* dan diameter 1250 mm.
 - b. Panjang total dari rancang bangun terowongan angin rangkaian terbuka tipe *suckdown* yaitu 6328 mm.
 - c. *Test section* mempunyai penampang berbentuk persegi dengan *fillet* 250 mm, dengan dimensi 750 mm dan panjang *test section* 1200 mm.
 - d. Panjang *contraction* diperoleh 1513 mm dengan diameter *input* 1250 mm, diameter *output* 750 mm dan *fillet* 250 mm.
 - e. *Diffuser* berbentuk persegi dengan diameter *input* 750 mm, diameter *output* 1250 mm dengan *fillet* 250 mm dan panjang yang diperoleh 2915 mm.
2. Benda yang akan diuji pada terowongan angin merupakan prototipe yang sebenarnya (dengan memiliki ukuran 750 mm x 1200 mm).
3. Kecepatan maksimal pada terowongan angin rangkaian terbuka tipe *suckdown* pada *test section* mencapai 20 m/s.
4. Kinerja terowongan angin cukup baik dengan terdapatnya kecepatan aliran angin yang cukup homogen di penampang terowongan.
5. Dinding transparan memberikan keluasaan untuk pengamatan aliran melalui benda uji
6. Struktur terowongan angin secara keseluruhan cukup rigid dan mampu/memberikan keleluasan untuk mengatur benda uji.
7. Terowongan angin dibuat dengan sistem *knockdown* (bongkar pasang) artinya apabila tidak digunakan dapat dibuka dengan mudah untuk tiap modul/seksi, mudah dipindahkan karena memakai roda dan menghemat ruangan karena dapat disusun dengan mudah dibandingkan apabila dipasang permanen dengan susunan diassembling.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 2006. Buku Putih Penelitian, Pengembangan dan Penerapan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bidang Sumber Energi Baru dan Terbarukan untuk Mendukung Keamanan Ketersediaan Energi Tahun 2025, Kementerian Negara Riset dan Teknologi Republik Indonesia.
- Anton, Philip S., 2004, *Wind Tunnel and Propulsion Test Facilities : An Assessment of NASA's Capabilities to Serve National Needs*. Santa Monica, CA : RAND Corporation.
- A. S. Abdelhamed, Y. E. S. Yassen, and M. M. Elsakka, "Design optimization of three dimensional geometry of wind tunnel contraction," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 6, no. 1, pp. 281–288, 2014.
- Geothert, Bernhard H., 2008, *Transonic Wind Tunnel Testing*. New York, NY : Dover Publication.
- Gorlin, S.M., Slezinger., I.I, 1996, *Wind Tunnels and Their Instrumentation*. National Aeronautics and Space Administration, USA and the National Science Foundation, Washington DC.
- Damora Rhakasywi. *Karakteristik Sifat Transport dan Struktur Aliran Resirkulasi di Bawah Pengaruh Eksitasi Eksternal*. Tesis S2 Universitas Indonesia - Juni 2010
- Harinaldi., Damora Rhakasywi. Pengaruh Ukuran Zona Resirkulasi Terhadap Sifat Transport *Separated-Reattached Flow* Dengan Eksitasi Eksternal. Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM), 13-15 oktober 2010. ISBN : 978-602-977 42-0-7
- Harinaldi., Damora Rhakasywi., Sri Haryono. *Experimental and Computational Study on Thermal Structure of a Separated Reattachment Flow under Heated Gas Injection*. International Meeting on Advances in Thermo-Fluids (IMAT), 16-17 November 2009.
- Harinaldi., Damora Rhakasywi. Kajian Komputasi Medan Aliran Resirkulasi Di Bawah Pengaruh Eksitasi Eksternal Berupa Injeksi Jet. Seminar Nasional Teknologi Industri 2010 (SNTI), 24 Maret 2010. ISBN : 978-979-18265-2-5
- Harinaldi., Damora Rhakasywi., Rikko Defriadi. *Flow and Heat Transfer Characteristics of an Impinging Synthetic Air Jet under Sinusoidal and Triangular Wave Forcing* *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS Vol : 11 No.03 June 2011*
- Harinaldi., Damora Rhakasywi., Rikko Defriadi. *The Effect of Oscillation Mode To The Temperature Distribution of a Heated Wall Impinged by a Synthetic Jet* (Quality in Research) QIR 4-7 July 2011 in Bali. ISSN : 114-1284

- Harinaldi., Damora Rhakasywi., Rikko Defriadi. *Computational Study of Triangular Waveform Oscillation Mode To The Temperature Distribution of a Heated Wall Impinged by a Synthetic Jet*. International Meeting on Advances in Thermo-Fluids (IMAT)-Skudai, Johor Bahru, Malaysia 2011.
- Harinaldi., Rikko Defriadi., Damora Rhakasywi. *Effect of Cavity Design of Synthetic Jet Actuator to the Heat Transfer Characteristic of an Impinging Flow Configuration*. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)* Vol.6 No.1 – 2012
- Harinaldi., Arief Randy., Aldy Andika., Damora Rhakasywi. *The Characteristics of Cooling On Heat Sink Using A Cross Flow Synthetic Jet Actuated By Variation of Wave Function*. WSEAS. 2013. ISSN : 2224-3461
- Harinaldi., Engkos A Kosasih., Damora Rhakasywi., Rikko Defriadi. *Forced Cooling On a Heated Wall With Impinging Flow Configuration Using Synthetic Jet Actuator Under Combined Wave Excitation*. *Jurnal Teknologi - | eISSN 2180–3722 | ISSN 0127–9696 UTM* (2012).
- Ismail, Samsul Kamal., Purnomo., Sarjiya., Sulaiman Tampubolon., Azhim Asyratul azmi., & Inderanata, 2015a. *Modification of Open Circuit Wind Tunnel*. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences* Vol. 10, No. 18: 8150-8156.
- Ismail., Samsul Kamal., Purnomo., Sarjiya., Sulaiman Tampubolon, 2015b. *Wake Effect and Power Production of Wind Turbine Arrays*. *Modern Applied Sciences* Vol. 9, No. 11: 77-88.
- Ismail, Samsul Kamal., Purnomo., Sarjiya, 2015c. *Investigating the Influences of Two Position (Non-Staggered and Staggered) of Wind Turbine Arrays to produce power in a Wind Farm*. *Proses Review di “3rd Regional Conference on Energy Engineering (RCEnE) in conjunction with 7th International Conference of Thermofluids”*.
- Ismail., Samsul Kamal., Purnomo., Sarjiya., Budi Hartono, 2015d. *Economic feasibility of wind farm: A case study for coastal area in south purworejo, Indonesia*. *Energy Procedia* Vol 65: 146-154.
- Ismail., Samsul Kamal., Purnomo., Sarjiya., Anshary, A. A, 2014a. *Design and Experiment of Open Circuit Low Speed Wind Tunnel*. *Proceeding of International Conference on Green Technology*, pp. II. 30-33.
- Ismail., Samsul Kamal., Purnomo., Sarjiya., Prajitno, 2014b. *Optimized of wind farm configuration: a case study*. *Asian Journal of Applied Sciences* Vol.2, No. 6: 936-945.
- I Gede Eka Lesmana, Ismail, Yohannes Dewanto, 2012a. *Rancangan Turbin Angin Tipe Darrieus H Menggunakan analisis banyak sudu pada Rotor Turbin*. *Teknosain*, Vol. 09, Issue 02, hal. 15-22.

- Ismail, 2012b. Desain algoritma Alat Pengendali pada Turbin. Teknosain, Vol. 09, Issue 01, hal. 109-117.
- Ismail, 2009. Analisis Energi Optimum Pada Sistem Konversi Energi Angin Nelayan Untuk Pembangkit Tenaga Putaran Rendah. Teknosain, Vol. 6, Issue 1, Hal.
- J. H. Bell and R. D. Mehta, "Contraction Design For Small Low-Speed Wind Tunnels," no. NASA CR 182747 April. Stanford University, California US, pp. 1–20, 1988.
- Kubesh, R.J., Allie, B.W., 2009, *A wind tunnel for an undergraduate laboratory*, International Journal of Mechanical Engineering Education, Vol. 37, 1: pp. 21-26.
- Mayya, R., 2012, *The wind tunnel performance investigation by using the modeling and simulation*. Energy Procedia, Vol 19, pp. 80 – 86.
- M. A. G. Hernández, A. I. M. López, A. A. Jarzabek, J. M. P. Perales, and Y. Wu, "Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel," in *Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Application*, InTech, 2013, pp. 3–28.
- M. Rodríguez *et al.*, "Novel design and experimental validation of a contraction nozzle for aerodynamic measurements in a subsonic wind tunnel," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 118, pp. 35–43, 2013
- P. Moonen, B. Blocken, and J. Carmeliet, "Indicators for the evaluation of wind tunnel test section flow quality and application to a numerical closed-circuit wind tunnel," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 95, no. 9–11, pp. 1289–1314, 2007.
- Owen, F.K., Owen, A.K., 2008, *Measurement and assessment of wind tunnel flow quality*. Progress in Aerospace Sciences, Vol. 44, Issue 5, pp. 315–348.
- Pankhurst, R.C., Holder, D.W, 1965, *Wind-tunnel technique*. Sir Isaac Pitman and Sons, London.
- Rehman, K., Malik, A.M., Sarwar, W., Zafar, M.F., 2011, *An analysis of flow turbulence in a wind tunnel using Turbulence Sphere*, NUST College of Electrical and Mechanical Engineering, Pakistan.
- T. Morel, "Design of Two-Dimensional Wind Tunnel Contractions Design," *J. Fluids Eng.*, no. June 1977, pp. 371–377, 2013.