

KAJI EKSPERIMENTAL MESIN STIRLING TIPE β MENGUNAKAN VARIASI BAHAN BAKAR BIOMASSA

Fenoria Putri¹⁾, Dwi Arnoldi²⁾, Dicky Seprianto³⁾

¹⁾²⁾³⁾ Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Sriwijaya

Jl. Sriwijaya Negara Bukit Besar Palembang 30139 Telp: 0711-353414 Fax: 0711-453211

E-mail: putripolsri@gmail.com

Abstrak

Dengan latar belakang semakin menipisnya cadangan bahan bakar mineral, maka tujuan jangka panjang dari penelitian ini adalah memberikan solusi alternatif untuk mendapatkan energi mekanik yang tidak bergantung dengan bahan bakar mineral. Target khusus yang ingin dicapai adalah sosialisasi pemakaian bahan bakar nabati (biomassa) yang bersifat tarbarui (renewable). Metode yang dikembangkan adalah pemanfaatan Energi kalor dari pembakaran Biomassa untuk menggerakkan mesin Stirling. Penelitian ini bersifat Induktif dengan metode Kaji Eksperimental. Penelitian dimulai dengan melakukan Rancang bangun satu unit prototipe mesin Stirling tipe β satu silinder dengan kapasitas 5000 cc, dilanjutkan dengan melakukan pengujian mesin. Prototipe sudah diujicobakan beroperasi dengan tiga jenis bahan bakar biomassa, yaitu: gas hasil fermentasi ampas tebu, gas hasil fermentasi sampah basah serta api hasil pembakaran serbuk kayu gergajian dengan hasil sebagai berikut:

- Gas hasil fermentasi ampas tebu, menghasilkan data-data: putaran optimum mesin 950 rpm, daya spesifik 456 Watt/kg b bakar dan efisiensi 23 %
- Gas hasil fermentasi sampah basah, menghasilkan data-data: putaran optimum mesin 720 rpm, daya spesifik 405 Watt/kg b bakar dan efisiensi 21%
- Serbuk kayu gergajian, menghasilkan data-data: putaran optimum mesin 680 rpm, daya spesifik 324 Watt/kg b bakar dan efisiensi 21%

Kata kunci : Mesin Stirling, Energi terbarukan, pembakaran luar

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Cadangan bahan bakar mineral, yang meliputi minyak bumi(BBM), Gas alam serta batu bara, kian lama kian menipis. Bahan bakar tersebut sudah lama dikenal masyarakat dunia sebagai sumber energi kalor yang mudah didapatkan serta mudah dipakai pada mesin-mesin konversi energi kalor-mekanik: motor Diesel, motor bensin, turbin gas dan sistem tenaga uap. Di sisi lain keperluan industri akan sumber energi kalor yang dapat dikonversikan menjadi energi mekanik semakin meningkat. Dampak dari fenomena ini adalah: tidak lama lagi bahan bakar mineral akan habis.

Beberapa solusi yang telah dikembangkan antara lain pemanfaatan energi alam (air terjun, panas bumi, angin serta sinar matahari). Akan tetapi hal tersebut masih belum sepenuhnya dapat tersosialisasi karena masih menemui beberapa permasalahan, antara lain: biaya awal yang mahal, kurang praktis serta tidak konstan karena bergantung pada iklim/cuaca. Sementara itu pemakaian energi juga belum dapat diterima sepenuhnya oleh masyarakat, disebabkan bahaya radiasi sebagaimana bom nuklir yang terjadi di Hiroshima pada tahun 1945 yang lalu. Data statistik untuk pemakaian energi di Indonesia 15 tahun terakhir, dalam satuan Giga Jouler (GJ) dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 1. Pemakaian Energi di Indonesia*

Jenis pemakaian	Tahun 1995-2000	Tahun 2000-2005	Tahun 2005-2010
Industri	178 x 10 ⁶ GJ (45 %)	193 x 10 ⁶ GJ (47 %)	215 x 10 ⁶ GJ (46 %)
Transportasi	124 x 10 ⁶ GJ (37 %)	131 x 10 ⁶ GJ (38 %)	139 x 10 ⁶ GJ (38 %)
Rumah tangga	78 x 10 ⁶ GJ (18%)	82 x 10 ⁶ GJ (15 %)	88 x 10 ⁶ GJ (16 %)
Total	380 x 10 ⁶ GJ	406 x 10 ⁶ GJ	442 x 10 ⁶ GJ

*Data dari: Buletin ESDM, Januari 2011 melalui website: <http://www/esdm.inf.ktyu.go.id/>

Di sisi lain, cadangan bahan bakar mineral dunia, jika dieksplorasi tanpa batas, akan habis dalam waktu: 65 tahun (untuk BBM) dan 150 tahun (batu bara). Pemakaian energi alam yang lain, seperti Sinar matahari, angin serta air terjun, masih terkendala pada kontinuitas serta investasi awal yang mahal. Alternatif lain yang masih menimbulkan pro dan kontra adalah pemakaian energi kalor hasil proses reaksi fusi dan fisi atom yang umum disebut energi nuklir. Solusi ini masih belum sepenuhnya dapat diimplementasikan mengingat dampak negatif yang ditimbulkan jika terjadi kegagalan. Kasus ledakan reaktor nuklir Chernobyl (1979) dan yang terakhir dampak gempa bumi pada reaktor Fukushima di Jepang (Februari, 2011) hingga saat ini masih menghantui masyarakat akan dampak bahaya radiasi yang ditimbulkan.

Penelitian ini merupakan kelanjutan dari penelitian sebelumnya (Widagdo, T, 1998), yang memiliki obyek penelitian Mesin Stirling tipe α dan dioperasikan dengan bahan bakar batu bara. Tujuan khusus yang hendak dicapai dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan Korelasi Empirik dari Variabel-variabel penelitian yang sudah ditetapkan pada penelitian ini. Variabel-variabel penelitian yang berkaitan langsung dengan kinerja mesin adalah: daya mesin, putaran optimum, efisiensi serta daya spesifik mesin. Sedang variabel lain yang tidak berhubungan langsung dengan kinerja mesin antara lain: getaran, kebisingan serta polutan yang dihasilkan dari proses pembakaran mesin. Prototipe akan diujicobakan beroperasi dengan tiga jenis bahan bakar biomassa, yaitu: gas hasil fermentasi ampas tebu, gas hasil fermentasi sampah basah serta api hasil pembakaran serbuk kayu gergajian.

Kegiatan tersebut merupakan implementasi dari pemanfaatan energi kalor yang berasal dari pembakaran material nabati (Biomassa). Sebagaimana diketahui bahwa biomassa adalah bahan bakar yang bersifat *renewable*, berasal dari tumbuh-tumbuhan

dan ketersediannya tidak terbatas. Luaran penelitian terdiri dari:

- Laporan Penelitian yang berupa *hard copy* yang akan didistribusikan ke beberapa perpustakaan di Indonesia
- Laporan penelitian dalam bentuk *soft copy* yang akan diunggah ke internet melalui website: polsri.co.id
- Artikel ilmiah yang akan dipublikasikan melalui jurnal dan majalah ilmiah
- Data-data penelitian yang dapat dijadikan referensi bagi para peneliti lain untuk kegiatan penelitian sejenis
- Perangkat keras dalam bentuk rancang bangun mesin Stirling tipe β dilengkapi dengan SOP (*Standard Operation Procedure*) untuk pengoperasian mesin. Bermanfaat sebagai materi ajar mahasiswa pada disiplin ilmu Konversi Energi Kalor-Mekanik

Informasi yang akan dipublikasikan diusahakan bersifat lugas, logis dan runtut, sehingga mudah dimengerti oleh masyarakat umum yang *concern* pada perkembangan teknologi, meliputi: dosen, peneliti maupun para mahasiswa

2.1 Perumusan Masalah

Keutamaan (*Urgency*) penelitian terletak pada pemanfaatan energi kalor (panas) yang yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar nabati (biomassa), dimana bahan bakar tersebut tidak dapat dimanfaatkan oleh mesin pembangkit daya yang ada selama ini. Beberapa biomassa yang sudah dipakai secara komersial, seperti biodiesel, biopremium, *black liquor* dan lain-lain, masih terbatas pada pemakaiannya. Karena mereka dioperasikan sebagai bahan bakar pengganti untuk mesin yang selama ini dioperasikan menggunakan bahan bakar mineral. Material biomassa yang akan dijadikan sumber energi kalor antara lain:

- Gas hasil fermentasi sampah basah (Perry, 2001) yang sudah dimurnikan memiliki komposisi: gas Metana (CH₄): 85 %, gas Etana (C₂H₆): 6,6 %, gas

sulfur dioksida (SO₂): 4,4% dan sisanya uap air (H₂O). Memiliki kandungan kalor, HCV: 6500 s/d 7200 kcal/kg. Gas ini dapat diperoleh dengan cara mencampurkan sampah basah (sisa sayuran dan buah) dengan bakteri pengurai Mollitneae Cocus, selanjutnya sampah basah dimasukkan ke dalam ruang kedap udara dengan durasi sekitar 3 hari. Proses pemurnian dilakukan untuk menurunkan kandungan air dan oksigen. Untuk penyimpanan, gas dapat dicairkan dengan cara menambahkan bahan Azeotrop selanjutnya dapat ditampung didalam tabung gas LPG..

- Ampas tebu (Baggasse). Di Indonesia banyak pabrik gula dengan limbah padat berupa ampas tebu. Untuk memusnahkannya, limbah dibakar atau dipendam dalam tanah. Ampas tebu memiliki nilai kalor, HCV : 5500 s/d 6700 kcal/kg.
- Serbuk kayu. Banyak dijumpai di perusahaan penggergajian, maupun pengrajin ukiran kayu, sebagai limbah padat. Pemanfaatan yang sering dijumpai di masyarakat adalah sebagai media tanam jamur maupun anggrek, namun jumlahnya sangat sedikit. Sebagaimana besar dibuang ke sungai, dipendam mdalam tanah maupun dibakar. Pembakaran serbuk kayu akan menghasilkan energi kalor: 5700 s/d 9800 kcal/kg (tergantung dari jenis kayu) kayu Ni tersebut dibakar (Perry, 2001)

Untuk meningkatkan kinerja (*Perfomansi*,), mesin hasil rancang bangun akan dioperasikan dengan tiga jenis fluida, masing masing: Amonia, Eter dan Air. Ketika fluida kerja beroperasi di dalam mesin, dikondisikan fluida akan terjadi perubahan fasa cair-gas atau sebaliknya. Kondisi ini bertujuan untuk meningkatkan koefisien perpindahan panas konveksi dari silinder mesin ke fluida kerja atau sebaliknya. Kinerja mesin ditunjukkan oleh daya spesifik dan efisiensi mesin.

2. BAHAN DAN METODE

2.1 Bahan Penelitian

Penelitian ini memiliki nilai kebaruan pada metode pemamanfaatan bahan bakar Biomassa. Jika mesin mesin penghasil daya

yang ada di masyarakat bekerja dengan prinsip pembakaran dalam (*Internal combustion*), maka prinsip pemanfaatan energi kalor hasil pembakaran yang dikembangkan, pada mesin Stirling, adalah pembakaran luar (*External combustion*). Prototipe mesin Stirling hasil rancang bangun akan bersifat *mobile* sehingga sesuai untuk dipakai sebagai penggerak kendaraan bermotor.

Studi pendahuluan untuk mendukung penelitian ini meliputi kaji pustaka, penelusuran jurnal serta kaji eksperimental yang berkaitan dengan rancang bangun mesin Stirling yang akan dilaksanakan.

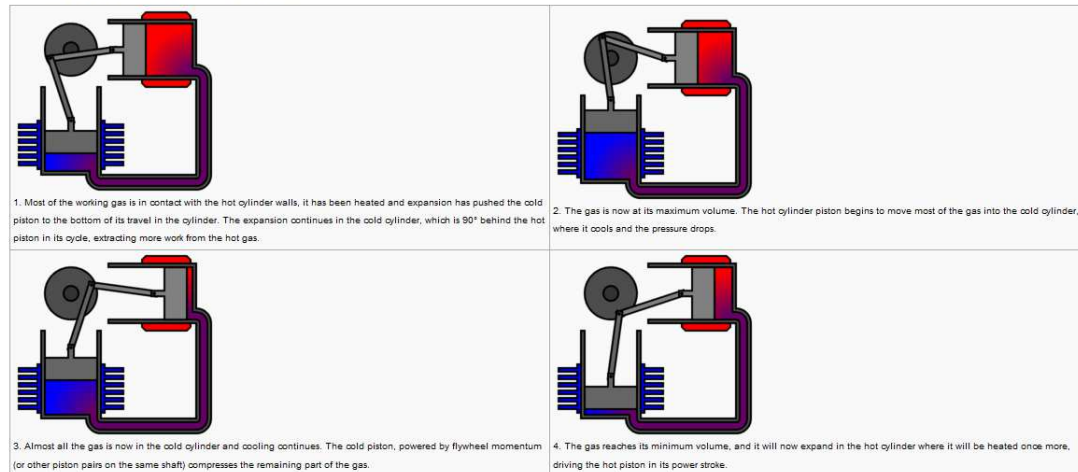
Mesin Stirling diciptakan pertama kali pada tahun 1816 oleh ilmuwan Inggris bernama Robert Stirling, 40 tahun setelah diciptakannya mesin uap torak oleh James Watt (1786). Mesin ini bekerja atas dasar pemanfaatan energi kalor temperatur tinggi menjadi enegi mekanik (power) dengan prinsip pembakaran luar (*Extenal Combustion Engines*). Sebagaimana mesin pembangkit daya yang lain, mesin Stirling juga mengacu pada siklus Carnot (Kent's, 1987). Pada awal ditemukannya, mesin Stirling dioperasikan menggunakan fluida kerja pada fasa gas sehingga memiliki performansi rendah.

Perkembangan teknologi serta tuntutan konsumen, pada tahun 1923 mesin Stirling kalah berkompetisi dengan mesin Diesel dan mesin bensin yang bekerja dengan prinsip pembakaran dalam (*Internal Combustion Engines*). Kedua jenis mesin tersebut memiliki kelebihan dari segi efisiensi serta daya spesifik yang lebih baik. Bentuknya yang kompak sehingga sangat sesuai untuk dipakai sebagai mesin penggerak kendaraan bermotor. Akan tetapi mesin Disesl dan mesin bensin memiliki kekurangan dari segi konsumsi bahan bakar yang sangat tergantung dari jenis bahan bakar minyak BBM.

Berdasarkan prinsip kerjanya, mesin Stirling dibagi menjadi 2 jenis, yaitu:

- a. Tipe α , terdiri dari dua silinder yang masing-masing berperan sebagai silinder panas dan silinder dingin. Kedua silinder membentuk sudut 90⁰ dan torak yang terdapat didalamnya dihubungkan oleh batang penghubung ke satu titik yang ada pada poros engkol.

The following diagrams do not show internal heat exchangers in the compression and expansion spaces, which are needed to produce power. A regenerator would be placed in the pipe connecting the two cylinders. The crankshaft has also been omitted.



Gambar 1 : Mekanisme Mesin Stirling Tipe α

Poros engkol berputar searah jarum jam. Pemanasan fluida kerja terjadi pada silinder panas, sedangkan pada silinder dingin fluida kerja didinginkan menggunakan udara bebas. Prinsip kerja mesin dimulai dengan posisi 1 (kiri atas) dilanjutkan dengan posisi 2,3 dan 4 secara runut.

- Posisi 1 (kanan atas, sudut 0°) : Gas suhu tinggi dari silinder panas mengalir ke silinder dingin, selanjutnya gas mulai didinginkan sehingga mengalami penurunan tekanan. Gerakan poros engkol terjadi karena kelambatan massa dari kerja sebelumnya.
 - Posisi 2 (kiri atas, sudut 90°): Gas mengalami pendinginan maksimum dan menarik torak panas ke arah kanan pada saat yang sama torak dingin dalam posisi berhenti dan tidak bisa mengambil kerja dari proses tersebut. Gerakan poros engkol terjadi dengan memanfaatkan kelambatan massa.
 - Posisi 3 (kiri bawah, sudut 180°): Gas mulai dipanaskan pada silinder panas akan tetapi belum mengalami kenaikan tekanan yang signifikan sehingga belum menghasilkan kerja. Gerakan poros engkol terjadi dengan memanfaatkan kelambatan massa.
 - Posisi 4 (kanan bawah, sudut 270°): Sebagian besar gas dipanaskan di silinder panas, gas mengalami kenaikan tekanan dan menekan torak panas ke arah kiri (menghasilkan kerja), pada saat yang sama piston dingin pada posisi *lock*.
- b. Tipe β , terdiri dari satu silinder yang dipisahkan oleh bahan isolatif. Dibagian atas berfungsi sebagai silinder dingin yang di dalamnya terdapat torak daya

(*power piston*), sedang di bagian bawah adalah silinder panas yang di dalamnya terdapat torak peluncur (*displacer piston*).

Poros engkol berputar searah jarum jam. Torak daya dibuat rapat (tanpa kebocoran) baik terhadap silinder maupun batang torak. Torak peluncur diberi celah dengan ukuran tertentu dengan tujuan untuk dapat memindahkan fluida dari silinder panas ke silinder dingin atau sebaliknya. Batang torak dari kedua silinder membentuk sudut 90° pada poros engkol.

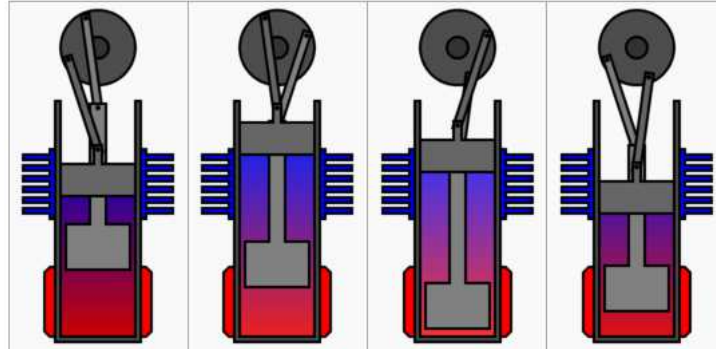
Prinsip kerja mesin dimulai dari posisi paling kiri adalah sebagai berikut:

- posisi 1: Torak daya menurunkan volume fluida suhu rendah, torak peluncur memindahkan sebagian besar fluida ke silinder panas. Gerakan poros engkol memanfaatkan kelambatan massa.
 - Posisi 2: Fluida dipanaskan di dalam silinder panas, mengalami kenaikan tekanan serta menekan torak daya ke posisi akhir gerakan. Ini adalah proses kerja satu-satunya yang terjadi.
 - Posisi 3: Torak peluncur turun ke bawah dan memindahkan sebagian besar fluida ke silinder dingin. Gerakan poros engkol memanfaatkan kelambatan massa.
 - Posisi 4: Fluida dingin dikompres oleh momentum poros engkol. Daya yang diperlukan untuk ini kecil mengingat fluida pada suhu dan tekanan rendah.
- Kedua tipe mesin Stirling, jika dibandingkan, masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Atas dasar

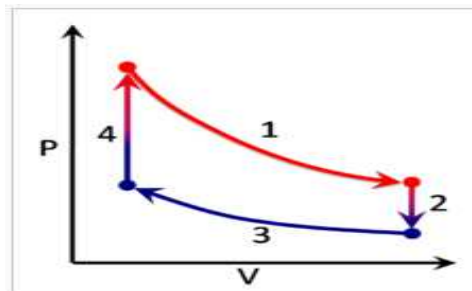
aspek konstruksi maka pada penelitian ini dipilih mesin Stirling tipe β

Siklus termodinamika mesin Stirling secara umum sama dengan siklus termodinamika motor bakar torak, hanya sistem pemasukan energi kalor pada mesin

Stirling terjadi dari luar silinder (*External omustion Engines*), sedangkan pada motor bakar torak terjadi dari dalam silinder (*Internal Combustion Engines*). Siklus selengkapnya dapat dilihat pada diagram P (tekanan) – V (Volume) berikut :



Gambar 2 : Mekanisme mesin Stirling tipe β



Gambar 3 : Siklus kerja mesin Stirling

- Proses 1 : Ekspansi isentropik, terjadi langkah kerja, torak mendorong poros engkol untuk berputar
- Proses 2 : Penurunan suhu dan tekanan fluida, torak bergerak tanpa beban
- Proses 3 : Kompresi isentropik, torak digerakkan oleh kelembaman poros engkol.
- Proses 4 Pemasukan energi kalor isovolimik, torak dalam keadaan *idle*.

Penelusuran kepustakaan yang telah dilaksanakan antara lain:

(Nazaruddin S, 2003), Untuk mesin Stirling tipe β disimpulkan bahwa untuk mendapatkan perfomansi maksimum, maka secara konstruktif rasio antara langkah torak (L) dengan diameter torak (D) bervariasi antara 1,25 s/d 1,40 bergantung dari kapasitas mesin. Semakin besar kapasitas mesin semakin kecil rasio dan semakin kecil kapasitas mesin semakin besar rasio.

(Effendi N dan Khadir Kh, 2005), Beberapa fluida *condensable* yang prospektif untuk

dapat dioperasikan sebagai pembangkitan daya adalah: Air, Amonia dan Ether. Ketiga fluida tersebut dikenal sebagai fluida yang *unflamable* pada kisaran operasi antara temperatur 550°C s/d 750°C.

(Maleev, 1986), Untuk menghindari bahaya ledakan, pengoperasian mesin Stirling tidak direkomendasikan untuk menggunakan minyak pelumas. Untuk itu beberapa material dengan koefisien yang dapat dipakai antara lain: Teflon, Rulon serta Grafit.

Persiapan awal untuk mendukung kegiatan penelitian antara lain:

- Persiapan sarana dan prasarana pendukung. Kegiatan penelitian akan dilaksanakan di laboratorium M&R Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Sriwijaya. Untuk rancang bangun mesin yang meliputi proses produksi dan perangkaian komponen, kegiatan akan dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Mekanik. Untuk Kalibrasi instrumen dan sistem kendali pengujian, kegiatan akan dilaksanakan di laboratorium

- Mekanik. Untuk pembuatan komponen presisi kegiatan akan dilaksanakan di laboratorium CNC. Semua berada di bawah institusi Politeknik Negeri Sriwijaya. Untuk pengujian performansi mesin serta analisis komposisi gas hasil pembakaran, kegiatan akan dilaksanakan di Laboratorium Sistem Propulsi Jurusan Teknik Mesin ITB. Pemeriksaan lapangan telah dilaksanakan secara informal dan disimpulkan bahwa semua peralatan/mesin dalam kondisi siap.
- b. Persiapan Sumber daya manusia. Mengingat penelitian ini bersifat multi disiplin, maka sumber daya yang terlibat meliputi tiga orang staf edukatif dari berbagai disiplin ilmu serta dua orang mahasiswa dari Jurusan Teknik Mesin. Diskusi serta koordinasi yang bersifat informal telah dilaksanakan dan masing masing anggota menguasai bidang tugas yang akan dilaksanakan. Untuk mahasiswa, diharapkan akan memperoleh ketrampilan terapan serta dapat menumbuhkan jiwa riset yang bermanfaat untuk pengembangan iptek.
 - c. Persiapan Kelembagaan dan managerial. Kegiatan ini bertanggung jawab langsung ke Institusi dengan *task force* UPPM (Unit Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat) Politeknik Negeri Sriwijaya. Beberapa persyaratan administrasi menyangkut jenjang pendidikan serta penguasaan ilmu dari masing masing anggota dapat disetujui oleh pihak UPPM. Untuk aspek managerial yang berkaitan dengan aktifitas penelitian, hal ini sudah dikordinasi dengan masing masing jurusan dan diestimasi tidak akan mengganggu proses belajar/mengajar di dalam kampus.

Studi pendahuluan yang berkaitan dengan kegiatan penelitian ini telah penulis lakukan dan dipublikasikan dalam bentuk artikel, antara lain:

1. (1998), judul: *Karakter Dinamik Mesin Stirling.*, Artikel ilmiah, Jurnal Teknik Mesin, ITB. Artikel berdasarkan buku teks, jurnal, prosiding serta majalah ilmiah. Dari kajian tersebut dapat disimpulkan bahwa mesin stirling akan bekerja pada efisiensi yang maksimum jika dioperasikan pada putaran optimum tertentu.
2. (1999), judul: *Mesin Stirling sebagai Solusi untuk mengatasi kelangkaan Bahan Bakar Minyak.*, Tuisan Ilmiah

bidang teknologi, dimuat di Harian Sumatera Ekspres 12 Agustus 1999. Substansi dari tulisan adalah bahwa mesin pembangkit daya yang paling prospektif untuk menggantikan motor bakar torak adalah mesin Stirling.

3. (2002), judul: *Dinamometer Mekanik dengan Pengatur Putaran Governoor Sentrifugal*, Laporan penelitian Dosen Muda DP2M. Sustansi dari penelitian adalah cara mengukur daya dan momentorsi mesin pembangkit daya berdasarkan variasi putaran mesin.
4. (2004) judul: *pembuatan Biodiesel Minyak Jarak Pagar menggunakan Metode Transesetrifikasi*. Prosiding Seminar Laporan Hibah bersaing 2004.2005. Informasi yang disampaikan dari artikel adalah mekanisme mendapatkan bahan bakar Biomassa yang ramah lingkungan dan bersifat *reneable*.
5. (2006) Judul: *Fermentasi ampas tebu untuk mendapatkan gas sebagai bahan bakar Biomassa.*, karya ilmiah tingkat jurusan, diseminarkan, didistribusikan ke beberapa perpustakaan. Informasi yang disampaikan adalah tentang pemanfaatan ampas tebu sebagai bahan bakar biomassa, sekaligus sebagai metode untuk penanggulangan pencemaran lingkungan.

Luaran (*outcomes*) dari penelitian akan direalisasi dalam bentuk:

1. Laporan Penelitian, yang akan didistribusikan ke beberapa perpustakaan, sehingga dapat dipelajari oleh masyarakat umum.
2. Artikel Ilmiah, yang akan di terbitkan baik melalui jurnal nasional maupun jurnal internasional.
3. Tulisan ilmiah bidang Teknologi yang akan dimuat pada media cetak lokal maupun nasional
3. Perolehan Hak kekayaan Intelektual melalui Paten Haki DP2M Dikti

2.1 Metode Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan Prototipe mesin Stirling tipe β yang akan dioperasikan menggunakan bahan bakar Biomassa. Paket Uji mesin dalam bentuk perangkat keras serta perangkat lunak yang dipat dipakai sebagai bahan praktikum bagi mahasiswa pada disiplin Ilmu Konversi Energi Kalor – Mekanik di Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Sriwijaya.

Rencana jangka panjang yang dilaksanakan setelah selainya penelitian ini adalah sosialisasi dari pemakaian energi kalor hasil pembakaran Biomassa menggunakan mesin Stirling. Untuk kegiatan tersebut, peneliti melibatkan institusi serta bekerjasama dengan pihak terkait, antara lain : pemerintah daerah/pusat, lembaga swadaya masyarakat yang peduli akan kelestarian lingkungan serta asosiasi/komunitas masyarakat yang peduli untuk perkembangan teknologi ramah lingkungan.

Penelitian ini merupakan kelanjutan dari penelitian sebelumnya(Widagdo, T, 1998), yang berjudul: '**Rancang bangun Degester Gas dari Ampas Tebu**'. Metode yang dipakai adalah Kaji Ekaperimental terhadap suatu fenomena alam dengan melibatkan beberapa variabel penelitian yang sudah ditetapkan. Secara umum kegiatan penelitian, secara runut dibagi menjadi enam kegiatan utama, yaitu:

1. Perancangan Mesin. Atas dasar pertimbangan dari aspek konstruksi dan mobilitas, maka mesin Stirling yang dipakai sebagai obyek pengujian adalah dari tipe β dengan spesifikasi utama: satu silinder, 150 cc, rasio panjang langkah/diameter torak 1,20. Perancangan mesin akan diselesaikan menggunakan program Komputer Autodesk Inventor[®] dengan luaran:
 - Gambar Konstruksi dalam bentuk proyeksi dan visualisasi serta dilengkapi dengan dimensi detail dari masing-masing komponen.
 - Distribusi temperatur dan tegangan yang terjadi pada masing-masing komponen baik pada arah radial maupun transversal.
 - Jenis material yang akan dipakai sebagai komponen mesin
2. Pembuatan Mesin. Kegiatan ini berintikan proses produksi komponen mesin. Skala prioritas diberikan untuk komponen-komponen presisi dengan cara memberikan perlakuan khusus berupa pengerjaan menggunakan CNC. Kegiatan dilanjutkan dengan *Assembly* (perangkaian) komponen yang sudah dibuat dengan sensntiasa mempertimbangkan aspek:
 - Kesejajaran, kesebidangan serta kestabilan mesin
 - *Knockdown*, artinya mesin dapat dengan mudah dibongkar pasang. Hal ini sngat penting untuk kegiatan perawatan dan perbaikan mesin.

- Aspek Mobilitas, artinya mesin dapat dengan mudah dapat dipindah secara manua dari satu tempet ke tempat lain tanpa harus menggunakan peratan lain sebagai bantuan.
3. Pengujian Awal mesin (*comissioning*). Bertujuan untuk mengetahui respon komponen mesin ketika mesin dioperasikan. Mesin dioperasikan dengan beban minimum hingga distribusi panas merata, selanjutnya beban dinaikkan secara perlahan lahan hingga mencapai beban maksimum. Pada beban maksimum akan dipertahankan untuk jangka waktu tertentu (± 10 jam). Perbaikan ataupun modifikasi komponen dilakukan jika diketahui ada yang rusak.
 4. Pemasangan sarana pendukung, yang meliputi sistem pembacaggotan data (instrumen), sistem pengendalain (kontrol) serta sistem keamanan.. Sebelum dipasang pada mesin, maka sarana pendukung akan dikalibrasi sesuai dengan daerah kerja yang dapat dilayani. Hal ini penting berkaitan dengan validitas ketika dilakukan pengambilan data pada mesin.
 5. Pengujian Mesin. Bertujuan untuk mendapatkan data pengujian berdasarkan variasi fluida kerja serja variasi bahan bakar yang sudah ditetapkan. Data yang akan diambil terdiri dari putaran mesin, daya mesin serta momen torsi. Kegiatan pengambilan data akan dilaksanakan di Laboratorium Motor Bakar dan Sistem Propulsi Jurusan teknik mesin ITB.
 6. Analisis Data. Bertujuan untuk memberikan gambaran reperentetatif tentang karakter mesin yang diuji. Setiap perlakuan akan diambil 10 data. Beberapa perangkat statistik yang akan dipakai untuk analisis data antara laian:
 - Uji *Chi square*, dipakai untuk pengujian homogenitas data
 - Uji *t-Student*, dipakai untuk memeriksa 'kenormalan' data
 - *Curve fitting*, dipakai untuk pembuatan grafik kecenderungan
- Keterlibatan anggota penelitian sangat berpengaruh terhadap target yang akan dicapai. Untuk hal tersebut, diskusi serta konsolidasi akan selalu dilaksanakan secara berkala. Kompetensi yang dimiliki oleh setiap anggota dipandang cukup sesuai dengan beban kerja yang akan mereka selesaikan. Terhadap sarana pendukung yang meliputi peralatan, komponen mesin,

sistem instrumentasi/kendali, sistem keamanan serta laboratorium yang akan dipakai, sudah dilakukan studi kelayakan, dan disimpulkan layak untuk dipakai sebagai sarana penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Penelitian

Kegiatan penelitian dilaksanakan di Laboratorium M&R Jurusan Teknik Mesin Polstri dengan melibatkan seluruh anggota penelitian. Dimulai dengan rancang bangun 1 unit Mesin Stirling tipe β dengan kapasitas 150 CC.

Beberapa hal penting sebelum melakukan pengujian, antara lain:

1. Kalibrasi alat ukur, bertujuan untuk memastikan bahwa pembacaan data akurat.
2. Pemeriksaan peralatan pendukung, bertujuan untuk memastikan bahwa perangkat pengujian akan dapat bekerja dengan aman.
3. *Commissioning*, yaitu melakukan pengujian awal terhadap perangkat uji dengan beban lebih, dengan tujuan untuk memastikan bahwa perangkat uji akan aman ketika dilakukan pengujian pada beban normal.

Variabel-variabel yang diperhitungkan antara lain:

- Putaran mesin
- Momen torsi poros engkol
- Daya mesin
- Konsumsi bahan bakar
- Efisiensi mesin

Variabel yang ditetapkan adalah bahan bakar biomassa, meliputi :

- Pembakaran gas hasil fermentasi ampas tebu
- Pembakaran gas hasil gasifikasi sampah basah
- Pembakaran serbuk kayu gergajian

Variabel yang diabaikan adalah:

- Fluktuasi tekanan udara lingkungan
- Kerugian kalor akibat isolasi yang kurang rapat.
- Gesekan komponen-komponen mesin ketika mesin bekerja

Prosedur pengujian yang sudah dilaksanakan, secara runut, adalah sebagai berikut:

1. Bahan bakar biomassa ditimbang untuk mengetahui massanya, selanjutnya dimasukkan ke dalam ruang bakar yang sudah tersedia.

2. Bahan bakar dihidupkan hingga merata, selanjutnya pintu ruang bakar ditutup hingga rapat.
3. Jika suhu silinder panas sudah mencapai suhu operasi, poros engkol diputar untuk memancing gerakan berputar. Jika poros engkol sudah memberikan perlawanan, selanjutnya pancingan dilepaskan dan poros engkol akan berputar sendiri.
4. Selanjutnya poros engkol dihubungkan dengan dynamometer untuk mengetahui variable variable : putaran mesin, momen torsi dan daya mesin
5. Prosedur 1 s/d 4 dilakukan untuk 3 jenis bahan bakar biomassa,



Gambar 4 : Prototipe mesin Stirling hasil rancang bangun

Pengujian dilakukan terhadap unit mesin Sterling tipe β dengan kapasitas silinder 150 CC. Dynamometer yang dipakai untuk mengukur prestasi mesin dilengkapi dengan instrumen Tachometer yang berfungsi untuk mengatur putaran mesin, n (rpm) dan torsimeter yang berfungsi untuk mengukur momen torsi yang terjadi pada poros mesin, T (N-m). Konsumsi bahan bakar yang disuplai ke mesin dihitung dengan metode grafimetri.

Daya mesin dihitung menggunakan formulasi:

$$P = T \cdot \omega = \pi \cdot n \cdot T / 60, \text{ Watt}$$

Dimana, T : momen torsi mesin, N-m
 n : putaran mesin, rpm

Efisiensi mesin dihitung menggunakan formulasi:

$$\eta = \frac{P}{\dot{m}_f} \times 100\%$$

Dimana, P : Daya mesin, Watt
 \dot{m}_f : laju aliran massa bahan bakar, kg/det

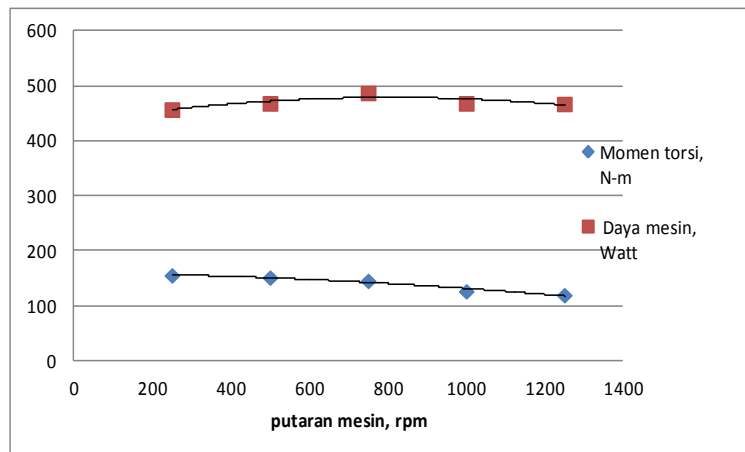
Tabel berikut menunjukkan tabel data hasil pengujian mesin untuk salah 3 jenis bahan bakar biomassa serta satu jenis fluida kerja

Tabel 2. Data-Data Hasil Data Pengujian Mesin Stirling

Bahan Bakar biomassa	Putaran mesin, rpm	Momen Torsi poros engkol, N.m	Daya mesin, Watt	Konsumsi bahan bakar, kg/det	Efisiensi mesin, %
Gas hasil fermentasi ampas tebu	250	155	457	0,054	8,6
	500	151	468.	0,057	9,4
	750	145	487	0,062	11,5
	1000	126	468	0,066	12,4
Gas hasil fermentasi sampah basah	1250	119.	467	0,070	10,9
	250	119	355	0,062	7,5
	500	116	364.	0,067	9,2
	750	103	383	0,063	11,3
Pembakaran serbuk kayu gergajian	1000	97	368	0,078	12,5
	1250	92	365	0,082	10,7
	250	115	457	0,54	8,6
	500	112	468.	0,57	9,4
	750	98	487	0,62	11,5
	1000	92	468	0,66	12,4
	1250	87.	467	0,70	10,9

3.2 Pembahasan

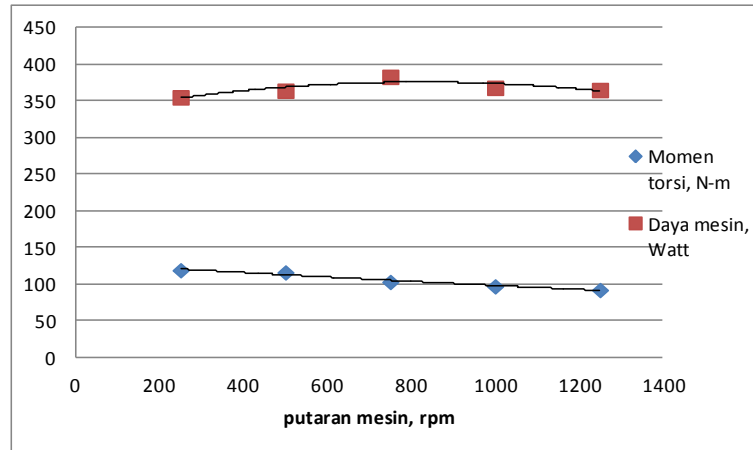
Pengoperasian mesin Stirling hasil rancang bangun sudah menghasilkan data pengujian yang mengindikasikan kinerja mesin. Parameter prestasi dalam bentuk Daya (energy mekanik) serta Efisiensi ditampilkan secara representative. Ketiga jenis bahan bakar biomassa memberikan dampak yang berbeda, baik dari segi daya maupun efisiensi mesin Stirling.



Gambar 5 : Karakter Mesin Uji Menggunakan Bahan Bakar Gas Hasil Fermentasi Ampas Tebu

Menggunakan metode turunan pertama diperoleh Daya maksimum mesin sebesar:

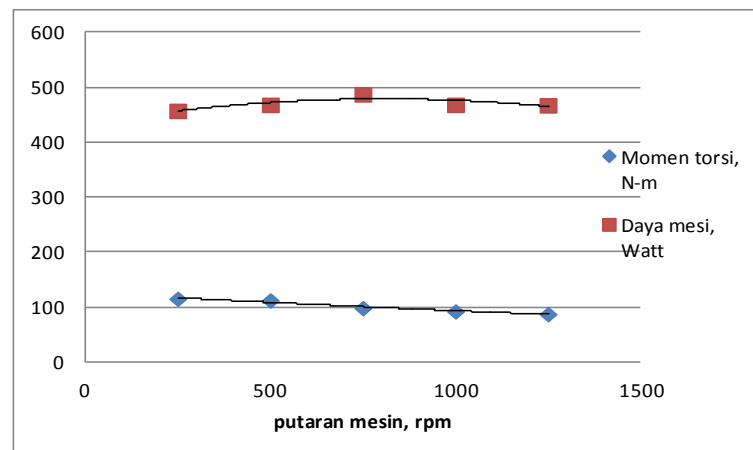
- $P_{maks} = 489$ Watt pada putaran, $n = 810$ rpm.
- Efisiensi maksimum, $\eta_{maks} = 12,45$ % pada putaran, $n = 950$ rpm



Gambar 6 : Karakter Mesin Uji Menggunakan Bahan Bakar Gas Dari Sampah Basah

Menggunakan metode turunan pertama diperoleh Daya maksimum mesin sebesar:

- $P_{maks} = 475$ Watt pada putaran, $n = 765$ rpm.
- Efisiensi maksimum, $\eta_{maks} = 12,23$ % pada putaran, $n = 878$ rpm



Gambar 7 : Karakter Mesin Uji Menggunakan Bahan Bakar Serbuk Kayu Gergajian

Menggunakan metode turunan pertama diperoleh Daya maksimum mesin sebesar:

- $P_{maks} = 505$ Watt pada putaran, $n = 823$ rpm.
- Efisiensi maksimum, $\eta_{maks} = 12,35$ % pada putaran, $n = 865$ rpm

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Penggunaan bahan bakar biomassa untuk menghasilkan daya sangat dimungkinkan, hal ini terlihat dari data pengujian terhadap satu unit mesin Stirling. Sebagaimana kita ketahui bersama bahwa ketersediaan bahan bakar mineral, yang meliputi minyak bumi serta batu bara, dalam waktu yang tidak lama lagi akan habis. Saat kinim kita harus mulai menerapkan konsep pemakain bahan bakar terbarukan yang

tersedia tak terbatas di alam. Sa;ah satunya adalah biomassa.

Hasil pengujian terhadap sebuah protiptipe mesin Stirling dengan kapasitas 150 cc, yang diujicobakan dengan 3 jenis bahan bakar biomassa, memberikan kesimpulan sebagai berikut:

- Untuk bahan bakar gas hasil fermentasi ampas tebu
 $P_{maks} = 489$ Watt pada putaran,
 $n = 810$ rpm.
 Efisiensi maksimum, $\eta_{maks} = 12,45$ %
 pada putaran, $n = 950$ rpm
- Untuk bahan bakar gas dari sampah basah

$P_{maks} = 475$ Watt pada putaran,
 $n = 765$ rpm.

Efisiensi maksimum, $\eta_{maks} = 12,23$ %
 pada putaran, $n = 878$ rpm

- c. Untuk bahan bakar serbuk kayu
 gergajian

$P_{maks} = 505$ Watt pada putaran,
 $n = 823$ rpm.

Efisiensi maksimum, $\eta_{maks} = 12,35$ %
 pada putaran, $n = 865$ rpm

4.2 Saran

Berkaitan dengan pemakaian protitipe mesin Stirling, penulis memberikan saran, antara lain:

- a. Lakukan perawatan rutin sesuai dengan jadwal perawatan yang sudah ditentukan
- b. Lakukan penoperasian mesin di bawah kapasitas maksimum agar mesin tidak cepat rusak
- c. Jika terjadi kerusakan, lakukan perbaikan dengan pengawasan teknisi yang sudah ditunjuk

DAFTAR PUSTAKA

1. Kent's (1950), *Mechanical Engineering Handbook*, Power Volume, 4th edition, Toppan Company, Tokyo
2. Maleev V I (1982) *Internal Combustion Engines*, International Student Edition, 17th printing, Mc-Graw Hill Book Company, London
3. Sailon dan Widagdo T(2002), *Dinamometer Mekanik dengan Pengatur Putaran Governoor Sentrifugal*, Laporan penelitian Dosen Muda DP2M.
4. Widagdo T dan Cholik M (1998), judul: *Karakter Dinamik Mesin Stirling.*, Artikel ilmiah, Jurnal Teknik Mesin, ITB.
5. Widagdo T(1999), 'Mesin Stirling sebagai Solusi untuk mengatasi kelangkaan Bahan Bakar Minyak', Tuisan Ilmiah bidang teknologi, dimuat di Harian Sumatera Ekspres 12 Agustus 1999.
6. Widagdo, T(2004) *Pembuatan Biodiesel Minyak Jarak Pagar menggunakan Metode Transesetifikasi*. Prosiding Seminar Laporan Hibah Bersaing 2004/2005.
7.ESDM (2011), 'Data Statistik Konsumsi Bahan Bakar di Indonesia, kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral Republik Indonesia
8.[http://www/ engine. ectcomb. Go.id/](http://www/engine.ectcomb.Go.id/): 'Stirling Engine, free encyclopedia International.