

**EVALUASI UNJUK KERJA TURBIN AIR PELTON
TERBUAT DARI KAYU DAN BAMBU SEBAGAI PEMBANGKIT LISTRIK
RAMAH LINGKUNGAN UNTUK PEDESAAN**
*(Performance Evaluation of Hydraulic Pelton Turbine Made of Wood and Bamboo
as Environmentally Friendly Electric Generation for Villages)*

Samsul Kamal dan Prajitno
Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik UGM
Jl. Grafika No 2 Yogyakarta, Indonesia, 55281, Tel : 0274521673
e-mail: samsulugm@yahoo.com

Diterima: 22 April 2013

Disetujui: 18 Juni 2013

Abstrak

Pemanfaatan energi air di Indonesia, khususnya untuk pembangkit listrik skala kecil di pedesaan masih perlu diprioritaskan untuk ditingkatkan dalam program memperoleh energi bersih yang ramah lingkungan. Pemanfaatan tersebut masih terkendala oleh biaya investasi yang relatif tinggi serta teknologi yang sesuai. Pemerintah mendorong pemanfaatan energi baru dan terbarukan melalui program Desa Mandiri Energi dengan menggunakan potensi dan sumber daya yang tersedia di pedesaan. Kajian ini bertujuan untuk mengevaluasi unjuk kerja turbin air Pelton untuk pembangkit listrik skala kecil dengan sudu terbuat dari bambu dan roda turbin dari kayu. Data yang terkumpul menunjukkan bahwa efisiensi pembangkitan mampu mencapai sekitar 28% untuk debit aliran 28 liter/detik dan tinggi jatuh efektif 7 m menggunakan nosel berpenampang empat persegi panjang. Walaupun dari aspek teknik dan lingkungan penggunaan bambu sebagai sudu turbin adalah baik dan sesuai untuk digunakan di pedesaan, namun unjuk kerja yang diperoleh masih perlu ditingkatkan dibanding dengan umumnya turbin Pelton yang terbuat dari logam. Hal ini diperkirakan karena bentuk alamiah lengkung bambu yang tidak optimum untuk sudu serta bentuk penampang nosel yang masih harus disesuaikan.

Kata kunci: energi air, pembangkit listrik tenaga mikro hidro, turbin Pelton, unjuk kerja.

Abstract

The use of hydroenergy in Indonesia, especially for small electric generation in rural areas is still to be priority increased in a program to find a clean and environmentally friendly energy. The use is still limited by relatively high investment cost and appropriate technology. Government has pushed the use of new and renewable energy through the Village Self-Reliant Energy Supply Program by using potential and available resources in the village. The objective of this study is to evaluate the performance of a hydraulic Pelton turbine for small electric generation with the buckets are made of bamboo and the runner is made of wood. Data collected from the study show that the efficiency of the generation is capable to be in about 28% for the flow rate of 28 liter/s and effective head of 7 m by using nozel which has a rectangular cross section. Although the use of bamboo as turbine buckets is technicality and environmentally good and it is suitable to be operated in villages but the performance achievement is still need to be increased compared to that of usual Pelton turbine wich is made of metal. This was predicted due to the natural curve profile of the bamboo which is not optimal fit for buckets and the cross sectional geometry of the nozel is still need to be fitted.

Keywords: hydroenergy, microhydro electric power generation, Pelton turbine, performance.

PENDAHULUAN

Kondisi Penyediaan Energi

Persoalan penyediaan kebutuhan energi di Indonesia menjadi isu sentral yang dapat mengakibatkan lemahnya ketahanan nasional di berbagai bidang, karena besarnya APBN yang dialokasikan untuk memenuhi kebutuhan itu. Oleh karena itu persoalan tersebut membutuhkan solusi strategis yang cepat dan tepat. Kenaikan laju kebutuhan energi yang sangat cepat, menurunnya ketersediaan sumber energi primer minyak yang sangat signifikan, harga distribusi yang mahal karena faktor geografi serta belum meratanya tingkat kesejahteraan masyarakat adalah kondisi yang harus diatasi dalam penyediaan energi di Indonesia.

Tabel 1. Produksi dan konsumsi energi listrik (GWH) di Indonesia (Dep. ESDM, 2010)

Tahun	Produksi	Konsumsi
2002	108.191,35	87.409,19
2003	113.019,68	90.439,69
2004	120.244,31	99.425,79
2005	124.449,59	107.031,26
2006	126.168,62	112.609,80
2007	141.711,30	121.554,79
2008	149.329,96	129.018,79

Sebagai gambaran kritisnya perbandingan produksi dan konsumsi energi dapat dilihat data dari Departemen ESDM (2010) yang menggambarkan peningkatan laju kebutuhan energi listrik yang sangat besar dan makin lama makin sulit diimbangi oleh produksinya sebagaimana terlihat pada Tabel 1. Padahal ketersediaan dan konsumsi energi merupakan suatu indeks kemakmuran atau kesejahteraan suatu negara, Toe dkk., (2012). Kondisi Indonesia ini terefleksi juga dengan munculnya berbagai wacana yang menggambarkan sulitnya mengkonstruksi kebijakan energi dalam skala nasional misal kebijakan pentarifan listrik, wacana pembatasan bahan bakar bagi orang mampu dan sebagainya. Sementara itu Indonesia memiliki sumber energi baru terbarukan yang

luar biasa seperti panas bumi, air, angin, matahari, biomassa dan sebagainya. Menurut Ikeda (2011), cara untuk mengatasi masalah penyediaan energi di Indonesia adalah memanfaatkan secara penuh (*full scaled*) potensi energi terbarukan. Lebih lanjut dinyatakan bahwa sangatlah sulit untuk mengkonstruksi sistem sentralisasi total penyediaan energi secara nasional karena keadaan geografis Indonesia. Dengan demikian, desentralisasi sistem penyediaan energi listrik dengan memanfaatkan energi terbarukan secara penuh merupakan satu-satunya cara untuk mengatasi masalah penyediaan energi di banyak bagian Indonesia. Berdasarkan pada kondisi tersebut desentralisasi penyediaan energi dalam bentuk yang lebih rinci yaitu mengusahakan pemanfaatan energi baru terbarukan yang ramah lingkungan di setiap pedesaan dengan memanfaatkan secara optimum potensi energi serta fasilitas yang dimiliki oleh masyarakat di pedesaan tersebut adalah suatu penyelesaian yang sangat strategis (Kamal, 2006). Bila penyediaan energi rumah tangga di setiap pedesaan dapat terpenuhi secara mandiri maka hasil tersebut akan memberikan kontribusi yang sangat signifikan terhadap penyediaan energi secara nasional. Pemerintah telah bergerak ke arah peningkatan penggunaan energi terbarukan dengan berbagai upaya pemanfaatan energi surya, angin serta mikrohidro. Upaya tersebut harus didukung dengan berbagai alternatif penyediaan teknologi konversi energi yang sesuai dengan potensi energi dan material yang terdapat di pedesaan (Kamal, 2012).

Upaya tersebut sebetulnya sudah diperkuat juga dengan telah dikeluarkannya suatu undang-undang, UU No 30/2007, tentang manajemen energi yang berbasis pada kebijakan, keberlanjutan dan wawasan lingkungan untuk menciptakan kekuatan mandiri di bidang pengaturan energi. Visi dari undang-undang tersebut adalah untuk memperoleh kemandirian penyediaan energi yang secara berkelanjutan didukung oleh kemampuan nasional pada penyediaan energi dengan melibatkan seluruh aset nasional dalam setiap langkah pengelolaan energi

mulai dari awal hingga akhir proses. Misi dari undang-undang tersebut adalah untuk memastikan ketersediaan energi bagi kebutuhan domestik, meningkatkan kualitas sumber energi, mengelola energi secara berkesinambungan termasuk di dalamnya guna memberikan perhatian yang memadai pada usaha pelestarian lingkungan serta meningkatkan kemampuan nasional. Upaya penyediaan energi listrik 10.000 MW dengan menggunakan sumber energi konvensional seperti batu bara harus betul-betul diperhitungkan terhadap aspek lingkungan yang ditimbulkannya. Karena itu, pemerintah melalui Departemen ESDM Direktorat Minyak dan Gas Bumi memprogramkan Kebijakan Energi Nasional yang menargetkan setidaknya 5 % dari pembangkit energi ditahun 2020 harus berasal dari energi baru dan terbarukan, Legowo (2008). Dicanangkan bahwa pada tahun 2025 pada saat mana kebutuhan energi primer diperkirakan mencapai sekitar 7,33 BOEPD keberadaan energi baru terbarukan diharapkan sudah mencapai sekitar 17 %.

Lebih lanjut, salah satu energi baru terbarukan yang cukup melimpah keberadaannya namun masih sangat kecil pemanfaatannya adalah energi mikro hidro. Berbagai bentuk turbin air dengan skala mikro maupun mini telah dapat dibuat dan dimanfaatkan dengan baik, Kamal (2009), termasuk di antaranya turbin air Gorlov yang memanfaatkan arus aliran air sungai. Berbagai studi menunjukkan bahwa potensi tenaga air di daerah pedesaan dengan kondisi ketinggian jatuh (*head*) yang cukup baik dengan debit aliran (*flow*) yang relatif kecil belum banyak dimanfaatkan. Selain itu turbin air yang telah dibuat dan dimanfaatkan masih banyak yang menggunakan material dan juga teknologi logam yang masih jarang diperoleh di pedesaan serta memberikan kontribusi pencemaran lingkungan yang cukup tinggi sepanjang rantai produksinya. Sejalan dengan visi dan misi yang termuat di dalam UU No 30/2007 maka solusi pemanfaatan sumber energi air di pedesaan untuk menciptakan kemandirian energi dengan memanfaatkan seoptimum mungkin potensi material yang ada di pedesaan merupakan

langkah strategis yang sangat tepat.

Bambu merupakan jenis tanaman rumput-rumputan (famili Graminae) yang tumbuh hampir diseluruh pedesaan di Indonesia. Batang bambu terdiri atas ruas dan buku atau internodia dan nodia. Di dalam internodia sel-selnya berorientasi ke arah sumbu aksial, sedangkan dalam nodia sel-selnya mengarah pada sumbu transversal. Berat jenis bambu berkisar antara 0,50 - 0,90. Berat jenis bambu menentukan sifat mekaniknya karena merupakan massa sel yang akan menerima beban atau gaya yang diberikan kepadanya (Liese, 1985). Bambu petung (*Dendrocalamus asper*) merupakan salah satu jenis bambu yang banyak terdapat di pedesaan Indonesia. Kuat tarik rata-rata bambu petung dapat lebih tinggi dari tegangan luluh baja dan karena itu bambu petung dapat digunakan untuk bahan-bahan konstruksi dengan diameter dan ketebalan yang besar, (Morisco dkk., 2005). Penelitian bambu untuk bahan bangunan banyak dilakukan dalam bentuk bahan asli yaitu bentuk bambu utuh atau bambu yang dibelah, disebut juga bilah bambu atau belahan bambu, Gambar 1.



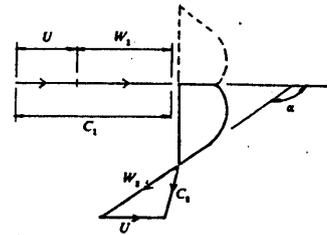
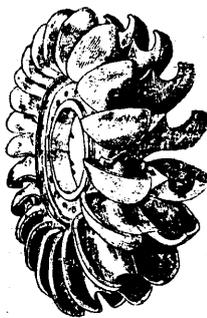
Gambar 1. Rumpun bambu, ruas bambu dan belahan setangkup ruas bambu, Morisco dkk., (2005)

Hasil pengujian sifat mekanik bambu oleh Morisco dkk. (2005), menunjukkan bahwa kuat tarik sejajar serat bambu jauh lebih tinggi daripada kuat gesernya. Kuat

tarik sejajar serat rata-rata bambu petung adalah 153,472 MPa sedangkan rata-rata kuat geser sejajar seratnya adalah 8,982 MPa. Kuat tekan sejajar serat dan kuat tarik tegak lurus serat menunjukkan bahwa kuat tekan sejajar serat bambu petung adalah 37,392 MPa dan kuat tekan tegak lurus serat rata-rata bambu petung adalah 1,775 Mpa.

Turbin Pelton

Turbin Pelton merupakan turbin jenis impuls yang belum banyak dikembangkan untuk skala pedesaan khususnya yang mempunyai potensi tenaga air dengan potensi tinggi jatuh air yang cukup besar. Turbin Pelton mempunyai bentuk sudu berupa cekungan yang memungkinkan impuls dari aliran air diubah menjadi gaya yang akhirnya memberikan torsi yang memutar roda turbin. Impuls yang tinggi diperoleh dengan kecepatan air yang tinggi dan untuk itu digunakan nosel. Jadi sudu turbin harus mampu menahan gaya akibat perubahan momentum pancaran air dari nosel (Khurmi, 2001). Secara teoritis kecepatan pancaran air dari nosel, C_1 , adalah $C_1 = \sqrt{2 g H}$. Namun demikian pada keadaan nyata kecepatan tersebut akan berkurang karena efek vena kontrakta yang terjadi pada lobang keluaran nosel yang bergantung pada bentuk geometri penampangnya. Berdasar pada diagram kecepatan Gambar 2, U adalah kecepatan keliling dari sudu, C_1 adalah kecepatan pancaran atau jet air keluar dari nosel, C_2 adalah kecepatan absolut air keluar dari nosel sedang C_x adalah kecepatan komponen kearah x .



Gambar 2. Roda turbin Pelton dan segitiga kecepatan air keluar dari sudu. Sumber : Sayers A.T. (1992)

Selanjutnya W_1 dan W_2 masing-masing adalah kecepatan relatif pancaran jet masuk sudu dan kecepatan relatif air keluar dari sudu. Sesuai persamaan Euler, daya turbin, W , dari setiap massa air, m , yang melalui turbin adalah

$$\frac{W}{m} = U_1 C_{x1} - U_2 C_{x2} \dots\dots\dots (1)$$

Pada kasus ini C_{x2} berarah negatif, dan karena itu

$$\frac{W}{m} = U \{ (U + W_1) + [W_2 \cos(180^\circ - \alpha) - U] \} \dots\dots\dots (2)$$

Bila dianggap tidak ada gesekan pada permukaan sudu maka $W_1 = W_2$ sehingga

$$\frac{W}{m} = U (W_1 - W_1 \cos \alpha) \dots\dots\dots (3)$$

Ungkapan daya, E , adalah dalam Watt dan seterusnya dapat diperoleh

$$E = U (C_1 - U) (1 - \cos \alpha) / g \dots\dots\dots (4)$$

Daya optimum diperoleh dengan

mendiferensialkan $\frac{dE}{dU} = 0$ sehingga dapat

diungkapkan daya maksimum

$$E_{max} = C_1^2 (1 - \cos \alpha) / 4g \dots\dots\dots (5)$$

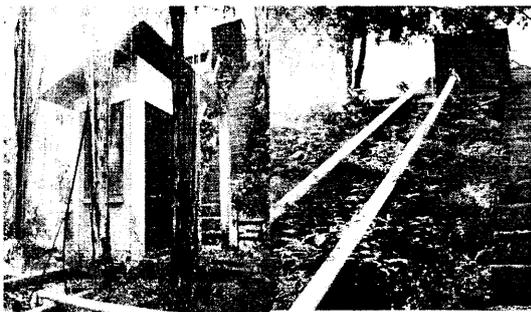
Sesuai dengan ungkapan tersebut daya maksimum turbin Pelton sangat ditentukan oleh keadaan nosel, C_v , dan sudut yang dibentuk sudu turbin α .

Berdasar pada uraian kondisi tersedianya energi air di pedesaan, bentuk serta sifat alamiah fisis dan mekanis dari bambu dan juga uraian daya turbin Pelton maka pemanfaatan bambu sebagai sudu turbin air impuls jenis Pelton sangatlah memungkinkan.

METODOLOGI PENGUJIAN

Fasilitas Uji dan Turbin Uji

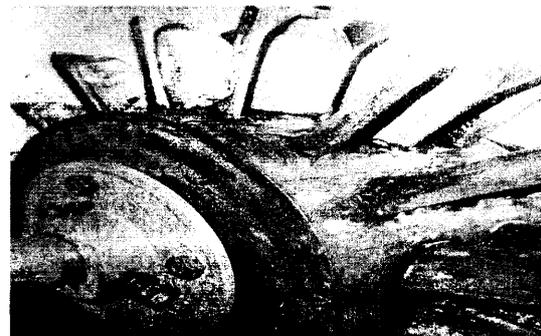
Pengujian dilakukan menggunakan sarana fasilitas uji turbin air yang telah ada di Jurusan Teknik Mesin dan Industri FT UGM seperti terlihat pada Gambar 3. Fasilitas uji terdiri dari bak penampung atau *reservoir*, pipa pesat, *gate valve*,udukan turbin uji dan rumah uji. Roda turbin dibuat dari papan kayu yang disusun dan dipola berbentuk lingkaran. Di sisi luar dari roda turbin dibuat slot atau alur sebagaiudukan untuk sudu-sudu. Sudu-sudu turbin atau *runner* dibuat dengan menggunakan ruas bambu petung yang sudah dipilih berdasar pada kesamaan diameter bambu dan ketebalannya.



Gambar 3. Instalasi uji turbin air Jurusan Teknik Mesin dan Industri FT UGM.

Setiap sudu dibuat menggunakan satu ruas bambu yang dibelah setangkup atau sama. Salah satu ujung belahan bambu tersebut yaitu bagian pangkal dibiarkan dengan setengah buku atau nodia yang masih utuh untuk ditempatkan sebagai

bagian lingkaran terluar dari konstruksi roda turbin dan sudu sebagaimana terlihat pada Gambar 4. Ini dimaksud agar pancaran air dari nosel yang mengenai sudu tidak akan mengalir keluar keatas, namun akan tetap mengikuti lengkung atau cekung ruas bambu tersebut. Selanjutnya bagian belahan yang lain yaitu bagian ujung yang tidak bernodia dimasukan ke dalam dudukan sudu yang sudah dibuat di sekeliling roda turbin dan dikunci menggunakan batang (*pin*) pengunci. Dengan demikian sudu tersebut akan duduk secara tetap disekeliling roda turbin. Tinggi sudu dibuat hingga $\frac{3}{4}$ dari panjang ruas. Poros dipasang tetap pada pusat roda turbin dan dengan sistem *belt and pulley* disambung ke generator. Variasi percobaan dilakukan dengan berbagai pembukaan katup (*gate valve*) pada pipa pesat untuk bervariasi debit aliran. Guna memperoleh variasi pancaran nosel agar dapat diperoleh variasi daya yang dihasilkan, maka dibuat dua jenis nosel dengan bentuk penampang geometri empat persegi panjang dan lingkaran dengan luasan yang sama. Nosel dengan penampang lingkaran adalah geometri standar yang umum dipakai pada turbin Pelton.



Gambar 4. Konstruksi turbin Pelton terbuat dari bambu dan kayu.

Untuk nosel berpenampang empat persegi panjang dibuat panjangnya sama dengan tinggi sudu dan lebarnya dibuat cukup tipis untuk memperoleh penampang pancaran air yang dapat mengikuti lengkung sudu. Unjuk kerja turbin dengan menggunakan dua jenis penampang geometri nosel tersebut kemudian

dibandingkan. Posisi nosel terhadap sudu sudu turbin saat kerja dapat dilihat pada Gambar 5.



NOSEL SUDU

Gambar 5. Posisi nosel dan sudu dalam keadaan kerja atau *running*.

Pengujian unjuk kerja turbin dilakukan sebagaimana suatu sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro, PLTMH, yang dihubungkan dengan generator dan *control panel* serta diberikan variasi beban berupa lampu. Data pengujian yang diukur di lapangan meliputi *head* atau tinggi jatuh yang diperoleh dari pengukuran tekanan, dan debit aliran air. Selanjutnya juga diukur putaran turbin sebelum dan setelah diberi beban, tegangan luaran generator dan arus luaran generator terhadap variasi beban.

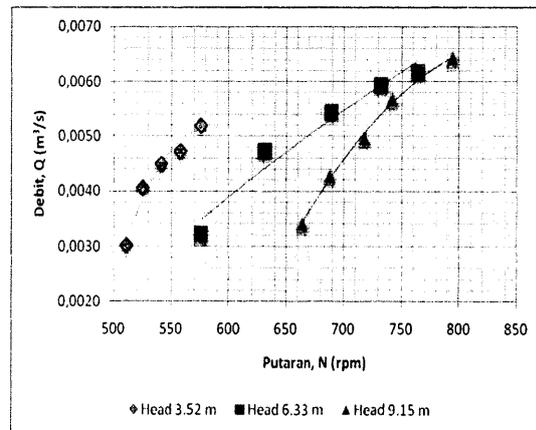
Spesifikasi Unit Uji

- Debit aliran air maksimum : 28 liter/detik
- Bak penampung : 1 x 1 m x tinggi 1,5 m
- Bak buangan : 2,6 x 1,7 m x tinggi 0,7 m
- Pipa pesat : PVC, Ø10 cm
- Jenis turbin : Pelton
- Diameter roda turbin : 40 mm
- Lebar sudu : 40 mm
- Diameter luar : 80 mm
- Transmisi Daya : *belt and pulley*
- Rasio diameter *pulley* : 1 : 4
- Jenis generator : Generator DC
- Kapasitas : 600 W
- Tegangan : 12 Volt

- Frekuensi : 50 Hz
- Putaran kerja : 1067 rpm
- Rumah uji : 2,10 x 1,85 m x tinggi 2,20 m

HASIL DAN PEMBAHASAN

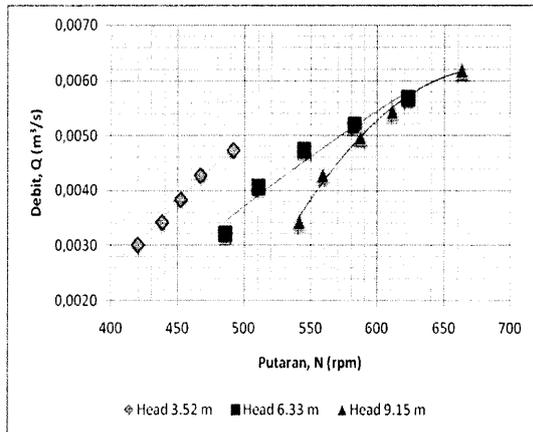
Pengujian pertama dilakukan dengan kondisi turbin tanpa beban dengan variasi tinggi jatuh, bentuk nosel dan debit aliran air, untuk melihat unjuk kerjanya terhadap putaran. Hubungan debit air dengan kecepatan putar untuk geometri nosel berpenampang empat persegi panjang disajikan pada Gambar 6. Hasil uji pada Gambar 6 menunjukkan bahwa hubungan antara debit air dengan kecepatan putar menunjukkan kecenderungan yang normal, yaitu semakin besar debit air yang masuk ke turbin mengakibatkan putaran turbin semakin besar untuk berbagai tinggi jatuh yang dibuat tetap.



Gambar 6. Grafik hubungan debit dengan putaran untuk nosel berpenampang empat persegi panjang.

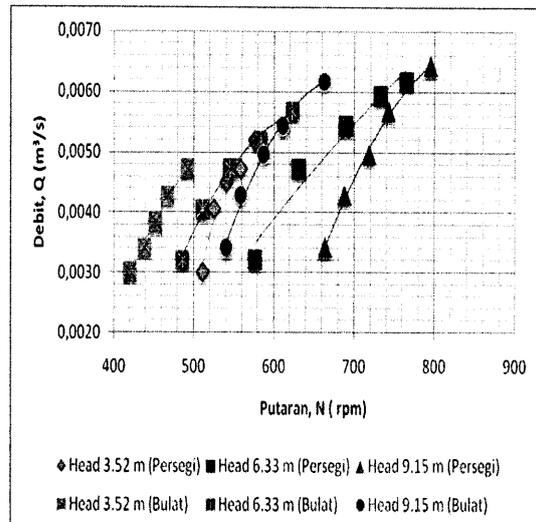
Putaran akan menuju ke titik maksimum untuk setiap tinggi jatuh yang diberikan. Pada penelitian ini diperoleh kecepatan putar maksimum dengan menggunakan nosel empat persegi panjang adalah sebesar 794,40 rpm pada tinggi jatuh 9.15 m dengan debit 0,0064 m³/s tanpa beban. Untuk nosel berpenampang lingkaran, hasil yang diperoleh disajikan pada Gambar 7. Kecenderungan hasil yang sama diperoleh

dari nosel berpenampang empat persegi panjang sebagaimana juga dapat dilihat pada Gambar 7. Putaran yang diperoleh dengan menggunakan nosel berpenampang lingkaran terlihat lebih kecil dibanding dengan putaran menggunakan nosel berpenampang empat persegi panjang. Ini diperkirakan karena penampang pancaran atau jet berbentuk lingkaran yang mengenai sudu yang berbentuk lengkung memanjang, mengakibatkan proses konversi momentumnya tidak optimum. Kecepatan putar maksimum yang diperoleh untuk penggunaan nosel berpenampang lingkaran adalah sebesar 663 rpm pada tinggi jatuh 9,15 m dengan debit 0,0064 m³/s tanpa beban.



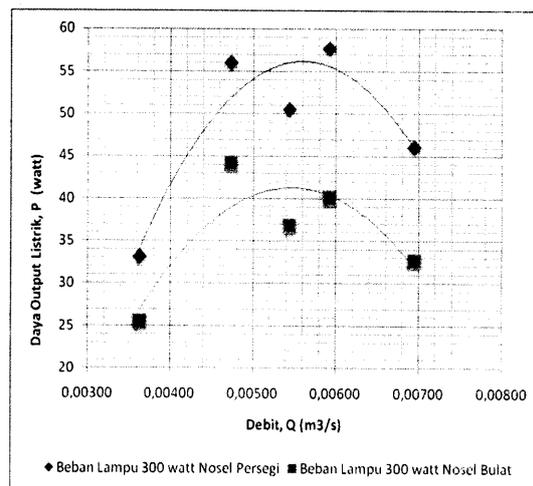
Gambar 7. Grafik hubungan debit dengan putaran untuk nosel berpenampang lingkaran.

Perbandingan kecepatan putar yang dihasilkan antara nosel berpenampang empat persegi panjang terhadap nosel berpenampang lingkaran dapat dilihat pada Gambar 8. Penggunaan nosel empat persegi panjang menghasilkan peningkatan putaran sekitar 25% terhadap nosel dengan penampang lingkaran untuk kondisi tinggi jatuh yang sama. Hal ini diperkirakan berasal dari proses perubahan momentum saat pancaran air dari nosel menumbuk sudu yang dipengaruhi oleh penampang geometri pancaran.



Gambar 8. Grafik perbandingan kecepatan putaran kedua jenis nosel.

Hasil ini secara konsisten juga dapat diamati dari unjuk kerja berupa daya luaran yang diperoleh untuk kedua jenis nosel sebagaimana diberikan pada Gambar 9. Pada penelitian ini diperoleh kenaikan daya luaran sekitar 40% pada penggunaan nosel berpenampang empat persegi panjang dibanding nosel berpenampang lingkaran untuk kondisi debit dan tinggi jatuh yang sama. Debit aliran air yang menghasilkan daya maksimum untuk masing-masing penampang geometri nosel terlihat hampir sama

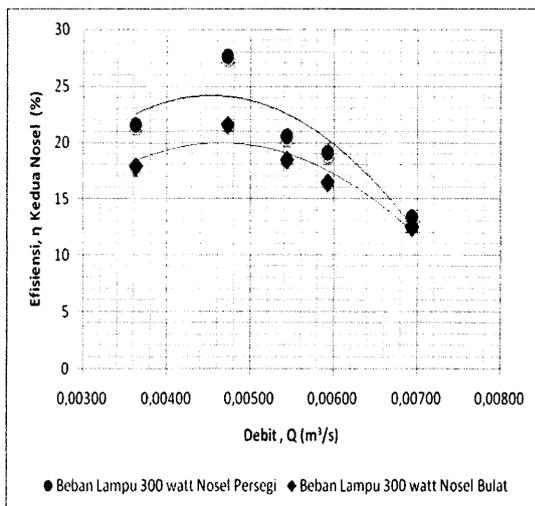


Gambar 9. Grafik hubungan debit dengan daya luaran kedua jenis nosel untuk beban yang sama.

Selanjutnya unjuk kerja turbin dianalisis terhadap efisiensi konversi energi yang dihasilkan oleh kedua jenis penampang nosel yang diuji.

Gambar 10 menunjukkan efisiensi konversi energi pada turbin untuk kedua jenis nosel tersebut untuk pembebanan yang diberikan sebesar 300 Watt. Hasil pengujian memberikan bahwa nosel dengan penampang empat persegi panjang memberikan efisiensi yang lebih baik dibanding nosel dengan penampang lingkaran. Peningkatan efisiensi turbin rerata sekitar 6% dapat diperoleh terhadap penggunaan nosel dengan penampang lingkaran. Untuk nosel berpenampang lingkaran, efisiensi yang dihasilkan adalah rerata sekitar 21,58% untuk berbagai debit aliran air pada tinggi jatuh 7 m. Sementara itu nosel dengan penampang empat persegi panjang mampu menghasilkan efisiensi rerata sebesar 27,59%.

Efisiensi turbin Pelton dengan sudu yang terbuat dari bambu masih lebih rendah dibanding dengan umumnya turbin Pelton yang menggunakan sudu terbuat dari logam yang bentuk sudunya dapat dirancang dan dimanufaktur namun banyak memberikan limbah pencemar dalam rantai proses produksinya.



Gambar 10. Grafik perbandingan efisiensi dengan debit air kedua jenis nosel untuk beban yang sama.

Keterbatasan geometri lengkung memanjang dari bambu yang terbentuk secara alamiah kelihatannya menjadi penyebab diperolehnya unjuk kerja yang kurang baik. Namun demikian pembuatan turbin yang relatif sederhana serta dapat dilakukan pada tingkat teknologi dan material yang tersedia di pedesaan dan dengan sifat ramah lingkungan, menjadikan turbin dengan sudu terbuat dari bambu dan roda turbin dari kayu perlu terus dikembangkan dan diimplementasikan terlebih untuk mendukung program kemandirian energi di pedesaan. Peningkatan unjuk kerja dapat dilakukan dengan perubahan bentuk penampang nosel menjadi empat persegi panjang yang secara baik menyesuaikan dengan bentuk lengkung dan memanjang alamiah bambu yang ada sehingga perubahan momentum pada sudu dapat berlangsung lebih optimum.

KESIMPULAN

Belahan setangkup ruas bambu yang cekung, secara teknik cukup memadai untuk dimanfaatkan sebagai bilah sudu-sudu turbin Pelton dan dengan demikian dapat dijadikan sebagai teknologi yang siap pakai untuk mendukung pemanfaatan sumber energi air di pedesaan.

Bentuk geometri ruas bambu yang cekung memanjang membutuhkan perubahan penampang geometri nosel dari lingkaran menjadi empat persegi panjang searah memanjang sudu agar unjuk kerja turbin Pelton dapat lebih optimum.

Efisiensi total yang dihasilkan adalah sebesar 28% pada debit aliran air sebesar 28 L/detik, tinggi jatuh efektif sebesar 7 m dan beban 300 Watt. Bentuk lengkung bambu yang ada secara alamiah tidak memungkinkan untuk memperoleh sudut sudu yang dapat menghasilkan efisiensi maksimum.

Walaupun belum dihitung secara rinci, namun pengurangan biaya investasi serta efek lingkungan yang ditimbulkan pada pemanfaatan turbin Pelton berbahan bambu dan kayu diperkirakan akan signifikan mengingat bahan yang tersedia di pedesaan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penghargaan yang tinggi disampaikan pada Jurusan Teknik Mesin dan Industri FT UGM yang telah memberikan dana penelitian melalui Program Hibah JTMI 2011 serta penggunaan fasilitas peralatan di Laboratorium terkait. Apresiasi dan terima kasih juga diberikan kepada saudara Muhibbuddin *Resources Engineering* Magister Sistem Teknik FT UGM yang telah memberikan waktu dan kemampuannya selama proses penyiapan dan pengukuran.

DAFTAR PUSTAKA

- Departemen ESDM, 2010. *Produksi dan Konsumsi Listrik*, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, Website: http://dtwh2.esdm.go.id/dtwh3/mod_fin/index.php?page=energi_listrik, diakses tgl 4 Agustus 2010.
- Ikeda K., 2011. *Trend and Challenge in Global Energy Development : Rethinking after Nuclear Crisis in Fukushima*, Seminar Pengembangan Energi Bersih Menuju Ketahanan Energi Nasional, Pusat Studi Energi dan Sekolah Pascasarjana UGM, Yogyakarta.
- Kamal S., 2006. *Studi Pengembangan Kincir Poros Vertikal dengan Mengoptimalkan Gaya Lift dan Drag*, Laporan Penelitian, Hibah Penelitian A3, LPPM UGM.
- Kamal S., Prayitno, 2009. *Pengembangan Gorlov Helical Turbine Untuk Pemanfaatan Arus Air Pada Pembangkit Listrik Terapung dengan Apungan Berbentuk Nosel*, Laporan Penelitian dengan biaya HKPSPN, DIKTI
- Kamal S., 2012. *The Use of Cow as an Electric and Thermal Power Generation in Remote Area as a Solution to Realize The Village Self-Reliant Energy Supply Program in Indonesia*, The 4th AUN/SEED-Net Regional Conference in Mechanical and Aerospace Technology, Ho Chi Minh.
- Khurmi, R.S., 2001. *A Textbook of Hydraulics, Fluid Mechanics and Hydraulic Machines*, S. Chand & Company Ltd, Ram Nagar, New Delhi.
- Legowo H.E, 2008. *Peranan Minyak dan Gas Bumi Menuju Ketahanan Energi*, Seminar on Application and Research in Industrial Technology, Yogyakarta.
- Liese, W., 1985. *Anatomy of Bamboo*, dalam Lessard dan Chuoinard, *Bamboo Research in Asia* IDRC , Ottawa.
- Morisco, Kamal S., Prayitno., 2005. *Pengembangan Proses Produksi Bambu Laminasi kualitas Tinggi Untuk Bangunan dan Mebel*, Laporan Hibah Bersaing Tahun Penelitian 2005, LPPM Universitas Gadjah Mada.
- Sayers, A.T., 1992. *Hydraulic and Compressible Flow Turbomachines*, International Edition, McGraw-Hill Book Company.
- Toe H., Thar W.W, Tun T.M., dan Soe K.K.S., 2012. *Design and Construction of Wind Turbine for Rural Area Application*, The 4th AUN/SEED-Net Regional Conference in Mechanical and Aerospace Technology, Ho Chi Minh, Vietnam.