Konsep dan *Preliminary* Desain Turbin Axial Temperature Rendah untuk Siklus Rankine Organik

Ignatius Riyadi Mardiyanto, Teguh Sasono

Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung 40012
E-mail: Ig_R_M@yahoo.com
E-mail: teguhssn@gmail.com

ABSTRAK

Turbin axial sebagai elemen pengkonversi energi, banyak digunakan untuk mengkonversi energi dari uap atau gas pada temperatur dan tekanan yang tinggi untuk menjadi gerak putar. Pada makalah ini disajikan konsep desain siklus Rankine organik (*ORC*) sebagai siklus dengan sumber panas masukan bersuhu rendah dan *preliminary* desain untuk turbin axial yang akan digunakan pada siklus tersebut. Sumber bersuhu renadah tersebut diambilkan dari studi literatur pada kasus temperatur sekitar 150^0C yang berasal dari air *brine* hasil separator uap pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP). Dengan berdasarkan pada bahasan konsep desain akan didapatkan jenis fluida kerja dari *ORC*, dan juga besarnya *flow* dari fluida pada siklus serta komponen-komponen pendukung siklus. Selanjutnya pada bahasan *preliminary* desain diuraikan tentang diameter *hub* dan tinggi *blade* maupun jumlah *blade* pada rotor serta stator untuk turbin sebagai mesin konversi energi.

Kata Kunci
Air panas brine, fluida kerja ORC, blade turbin

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Siklus Rankine Organik (*Organic Rankine Cycle - ORC*) digunakan sebagai salah satu pilihan untuk mengkonversi energi dari sumber panas pada temperatur relatif rendah. Salah satu sumber energi pada temperatur rendah dapat dihasilkan dari air panas buang (*brine*) separator uap pada PLTP[1].

Sumber panas bumi banyak terdapat di Indonesia, yakni Indonesia sebagai wilayah sabuk gunung api mempunyai potensi panas bumi sangat besar. Jawa Barat pada tahun 2006 telah teridentifikasi mempunyai potensi 40 titik lokasi, sedangkan total titik lokasi di Indonesia berdasarkan data geologi tahun 2006 tersebut diketahui sebanyak 256 titik[4]. Karena bentuk fluida pembawa panas dari dalam perut bumi tersebut adalah berupa uap dan air, maka untuk membangkitkan listrik pada PLTP, perlu dipisahkan uap sebagai sumber energi pembangkit PLTP, dengan air *brine* yang disuntikkan kembali ke dalam bumi. Sumber air panas *brine* dari panas bumi tersebut pada umumnya untuk PLTP di Indonesia masih mempunyai temperatur di sekitar 150^0C dan tekanan sekitar 10 bar[1]. Dengan masih cukup tingginya potensi panas tersebut dengan *flow* yang juga cukup besar, maka potensi ini kiranya masih layak untuk dikaji lebih lanjut untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif.

1.2 Tujuan

Tujuan umum dari penelitian ini adalah untuk mengkaji lebih lanjut tentang pemanfaatan energi dari panas bertemperatur rendah, seperti air *brine* PLTP dengan menggunakan *ORC*. Adapun tujuan khususnya adalah untuk mendapatkan *preliminary* desain dari turbin Rankine organik sehingga berdasarkan studi ini nantinya akan dapat diharapkan untuk dibuat detail desain dari turbin ORC pada skala demo untuk keperluan laboratorium. Yakni dengan skala ukuran sekitar 1- 5 kW daya mekanik turbin.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Separasi uap dengan air pada separator PLTP menghasilkan sisa berupa air panas *brine* dengan temperatur lebih dari 150^0C yang disuntikkan kembali ke dalam bumi, lihat pustaka [1] dan [2]. Untuk menanfaatkan air *brine* tersebut dapat dilakukan dengan *ORC*. Yakni siklus Rankine dengan menggunakan fluida kerja dari bahan refrigerant organik. Sehingga pembangkit dengan *ORC* dapat bekerja menghasilkan energi mekanik dari sumber panas dengan suhu rendah[6].

Untuk merealisasikan konsep tentang pembangkit dengan *ORC* tersebut di atas, kiranya perlu dibuat komponen pendukung siklus. Salah satu komponen utama pendukung siklus adalah turbin. Kajian tentang turbine Rankine organik ini yang telah dipublikasikan diantaranya adalah menggunakan model turbin *screw*[5]. Kajian tentang turbin Rankine organik ini dalam bentuk publikasi masih belum banyak pilihan. Penulis berinisiatif untuk melakukan kajian desain menggunakan media *software* simulasi yang telah beredar di pasaran untuk mengkaji turbin axial untuk *ORC*.

Adapun jenis turbin yang penulis kaji adalah jenis turbin gas dengan asumsi bahwa turbin ini cocok dengan fluida kerja kering. Kajian tentang turbin gas jenis axial sendiri masih terus dilakukan oleh para peneliti[3]. Pana tulisan ini penulis bermaksud untuk menjelaskan tentang turbin gas axial jika digunakan sebagai turbin *ORC*.

Adapun metodologi yang digunakan adalah dengan melakukan simulasi dari *ORC* sebagai sebuah konsep desain pembangkit. Kemudian dilanjutkan dengan simulasi untuk mendapatkan parameter penting dari *blade* turbin sebagai sebuah *preliminary* desain dari turbin Rankine organik. Dengan adanya parameter penting penyusun turbin tersebut, akan dapat diharapkan untuk mempermudah dalam pembuatan detail desain dari turbin axial untuk *ORC* nantinya.

3. KONSEP DESAIN

3.1 Parameter Masukan

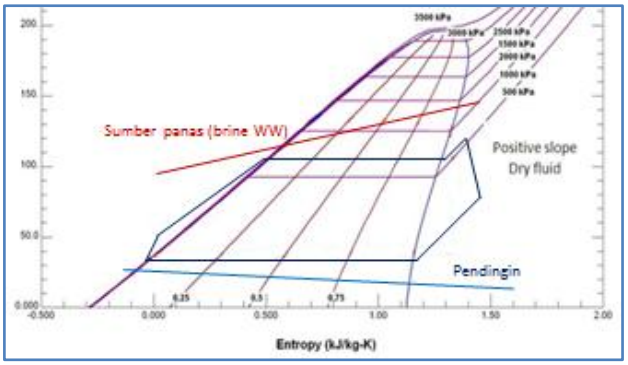
Sumber panas dari *brine* pada PLTP adalah potensi energi yang layak digali lebih lanjut. Pada umumnya di wilayah Indonesia laju alir dari *brine* ini cukup besar, sebagai contoh pada PLTP Wayang Windu mempunyai kandungan air *brine* senilai 50 kg/s dengan *entalphy* sekitar 700 kJ/kg sehingga cukup besar untuk diambil energinya[2]. Salah satu alternatif untuk pengambilan energi panas sisa dari *brine* ini adalah menjadikan panas menjadi listrik, dengan memakai pembangkit ORC[6].
Siklus Rankine selain mengambil energi dari sumber uap untuk dikonversi menjadi gerak dengan menggunakan turbin, juga akan membutuhkan komponen pengambil energi sisa panas ke gerak tersebut yang masih berupa fluida uap atau gas sehingga menjadi sepenuhnya cair kembali. Teknik untuk mengambil energi sisa dari kerja turbin, salah satunya adalah dengan memakai kondenser. Kondenser ini memerlukan media pendingin sebagai media transfer panas untuk dipindahkan kembali panas sisa tersebut ke lingkungan. Dengan demikian kondisi ambien menjadi penting untuk diperhatikan yakni agar kerja kondenser dapat diketahui dengan baik. Dengan temperatur lingkungan yang semakin dingin, dapat diharapkan tekanan dan temperature *outlet* dari turbine menjadi semakin rendah. Dengan semakin rendahnya *outlet* tekanan dan temperatur turbine, akan dapat diharapkan kenerja turbin meningkat pula.

Pada studi kasus *brine* Wayang Windu sebagai objek perancangan, diketahui bahwa temperatur lingkungan terpanas adalah sekitar 18 ^{0}C. PLTP Wayang Windu ini bertempat di ketinggian lebih dari 1000 mdpl terletak pada garis lintang 7°12′26.79″S, dan garis bujur 107°37′44.12″E, di Kecamatan Pengalengan, Kabupaten Bandung, Provinsi Jawa Barat[1]. Temperatur ambien ini merupakan potensi pembuangan yang dapat diharapkan untuk meningkatkan kinerja dari turbin.

3.2 Pilihan Fluida Kerja

Untuk memanfaatkan energi sisa yang berasal dari *brine*, dapat dilakukan dengan pembangkit ORC yakni pembangkit memakai siklus Rankine dengan fluida kerja dari bahan refrigerant organik[6]. Pemilihan bahan refrigerant ini dapat dilakukan dengan melakukan kajian pada diagram T-s dan atau diagram p-h dengan memperhatikan kondisi temperatur sumber dan temperatur lingkungan.

Hasil kajian konsep desain untuk *ORC* dengan memperhatikan efisiensi siklus pada studi kasus *brine* Wayang Windu, salah satu fluida kerja pilihan adalah n-pentane. Gambaran siklus Rankine organik pada diagram T-s untuk fluida kerja n-pentane diperlihatkan pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1: Diagram T-s fluida kerja n-pentane untuk siklus Rankine organik

Pada Gambar 1 terlihat bahwa fluida kerja pada tekanan 5 bar mempunyai temperatur saturasi sekitar 90^{0}C dan pada tekanan 1.3 bar temperatur saturasinya adalah sekitar 43^{0}C. Jika fluida kerja dirancang untuk kondisi penguapan pada temperatur 100^{0}C maka tekanan yang dibutuhkan adalah sekitar 6 bar. Jika temperatur dari sumber panas adalah 150^{0}C maka dapat dikatakan bahwa fluida kerja n-pentane tersebut pada tekanan 6 bar akan mengalami penguapan sampai kondisi superheat karena temperatur dari sumber panas akan memaksa gas n-pentane pada kondisi dua fasa menjadi fasa gas sepenuhnya. Gas n-pentane tersebut selanjutnya akan dapat digunakan untuk memutar turbin ORC.

Fluida n-pentane merupakan jenis fluida kering, sehingga ketika dipakai untuk kerja pada turbin, maka fluida tersebut akan tetap pada kondisi *superheat*. Hal ini diperlihatkan pada Gambar di atas. Untuk itu perlu dipikirkan bahwa setelah *outlet* turbine dapat dipasang penukar kalor-*recuperator* untuk mengambil sensibel *heat* sehingga fluida pada fasa gas tersebut menjadi lebih mendekati nilai laten *heat*-nya. Kondenser sebagai pengambil kalor laten dapat dipasang setelah *recuperator* ini sehingga kerjanya relatif ringan.

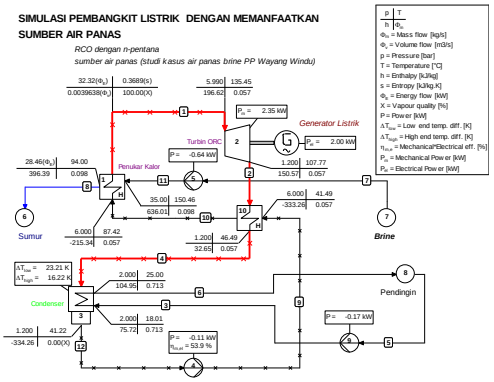
Fluida kerja n-pentane jika digunakan untuk ORC akan mempunyai keuntungan yakni karena kerja turbine akan selalu pada kondisi *superheat*. Namun kerugiannya adalah pada komponen kondenser, yakni jika tanpa *recuperator* sebagai pengambil kalor, maka kondenser bekerja pada kondisi *superheat* dengan jangkauan yang lebar untuk mengambil sensibel heat-nya, yakni sebelum proses pencairan dengan mengambil laten heat-nya dapat dilakukan. Jika hal tersebut ditempuh maka desain khusus untuk kondenser perlu dipikirkan lebih lanjut.

Karena sifatnya yang *dry fluid* tersebut maka n-pentane dapat dikatakan cocok untuk digunakan pada turbine gas untuk *ORC*. Turbine gas ini dirancang untuk temperatur kerja disekitar 100^0C disesuikan dengan temperatur sumber panas. Turbine gas jenis axial dapat dirancang untuk kecepatan putar sangat tinggi yakni sampai *supersonic*. Dengan kecepatan *supersonic* diharapkan efisiensi turbin menjadi tinggi.

Dari diagram T-s pada Gambar diperlihatkan bahwa n-pentane pada tekanan 6 bar dengan temperatur 100^0C jika entropy dinaikkan dengan menyuntikkan panas dari sumber senilai sekitar 150^0C maka fluida akan menguap sampai kondisi *superheat*. Dan fluida tersebut dapat mencair kembali pada temperatur 43^0C dengan tekanan sekitar 1.3 bar yakni dengan cara mengambil panas-nya memakai teknik recuperasi dan dilanjutkan dengan teknik kondensasi memakai fluida pendingin suhu ambien. Dengan demikian, n-pentane dapat merupakan pilihan fluida kerja ORC untuk kasus tersebut.

3.3 Laju Aliran Massa Fluida Kerja

Selain temperatur dan tekanan fluida kerja, untuk melakukan desain awal perlu diperhatikan adalah laju aliran massa fluida kerja. Laju aliran massa fluida kerja ini dapat ditentukan dari laju aliran massa fluida sumber energi. Laju aliran fluida kerja ini akan menentukan besarnya energi yang dapat dikonversi menjadi energi gerak pada turbin. Penentuan laju alir fluida kerja dapat dilakukan dengan iterasi perhitungan dengan batas nilai *flow* fluida kerja adalah tidak melebihi energi yang dapat ditransfer dari sumber panas menggunakan media transfer panas, kegiatan ini dapat dipermudah dengan menggunakan simulasi perangkat lunak untuk siklus Rankine yang sudah cukup banyak tersedia.



Gambar 1. Simulasi Pembangkit Listrik ORC dengan fluida kerja n-pentane

Pada penelitian ini karena turbin ORC baru akan digunakan sebagai keperluan demo di Laboratorium, maka dilakukan teknik terbalik yakni dengan cara menentukan daya *output* pembangkit yang diinginkan dengan ketentuan tidak melebihi batas energi yang dapat ditransfer oleh sumber panas objek studi, sehingga ORC dapat menenuhi satu siklus dengan baik. Pada perancangan ini ditetapkan bahwa n-pentane sebagai fluida kerja untuk menghasilkan daya turbin sekitar 2,35 kW. Hasil simulasi laju aliran massa fluida kerja pada siklus ini adalah 0.057 kg/s, dengan laju aliran massa fluida sumber panas adalah 0.098 kg/s sehingga masih bernilai jauh dibawah laju aliran *brine* di PLTP Wayang Windu sebagai objek studi. Simulasi dilakukan dengan menggunakan asumsi awal bahwa efisiensi total turbin bernilai sekitar 0.5 yakni karena tekanan kerja rendah. Gambaran selengkapnya dari simulasi ORC tersebut diperlihatkan pada

Gambar 1 berikut.

4. PRELIMINARY DESAIN TURBIN

Pembuatan *preliminary* desain turbin gas dapat dilakukan setelah mendapatkan gambaran siklus yang akan dilayani oleh turbin. Berikut adalah tahapan *preliminary* desain tersebut.

4.1 Data Awal *Premilinary* Desain Turbin

Untuk dapat melakukan rancangan turbin, pertama perlu diputuskan mengenai jenis turbin. Jenis turbin untuk siklus uap dapat ditinjau menjadi dua yakni turbin axial atau turbin radial. Dari kedua turbin ini akan dapat

dikombinasikan menjadi jenis ketiga yakni turbin campuran. Untuk keperluan pembangkit memakai ORC, dengan temperatur fluida sumber sebesar 150^0C maka temperatur kerja turbin dapat dimasukkan nilainya sekitar 110 sapai 135^0C. Karena tekanan fluida kerja rendah yakni dengan *inlet* 6 bar dan *outlet* 1.3 bar, pilihan jatuh pada turbine axial dengan putaran 20000 rpm. Putaran tinggi tersebut dimaksudkan untuk mengimbangi ringannya fluida kerja dan rendahnya tekanan fluida sehingga efisiensi turbin tetap relatif besar.

Setelah jenis turbine dengan rencana putaran poros ditentukan, agar simulasi dapat dilakukan maka pada parameter perancangan dilanjutkan dengan menambahkan data tekanan, temperatur masukan kerja turbin, tekanan kerja outlet turbin, kemudian juga perlu diperkirakan awal tentang diameter turbine dan tinggi *blade* [3]. Dari konsep desain tentang ORC dengan fluida kerja n-pentane, untuk menghasilkan daya keluaran sekitar 3 kW, ternyata laju fluida kerja yang cocok adalah sekitar 0.09 kg/s. Diameter *hub* penyangga *blade* turbin ditentukan pada sekitar 50 mm, dan panjang *blade* antara 5 s-d 10 mm dengan jumlah *stage* satu. Menggunakan bantuan *software* simulasi perancangan turbin gas, selanjutnya data-data tersebut dapat diolah untuk mendapatkan hasil *preliminary* desain.

4.2 Simulasi Desain

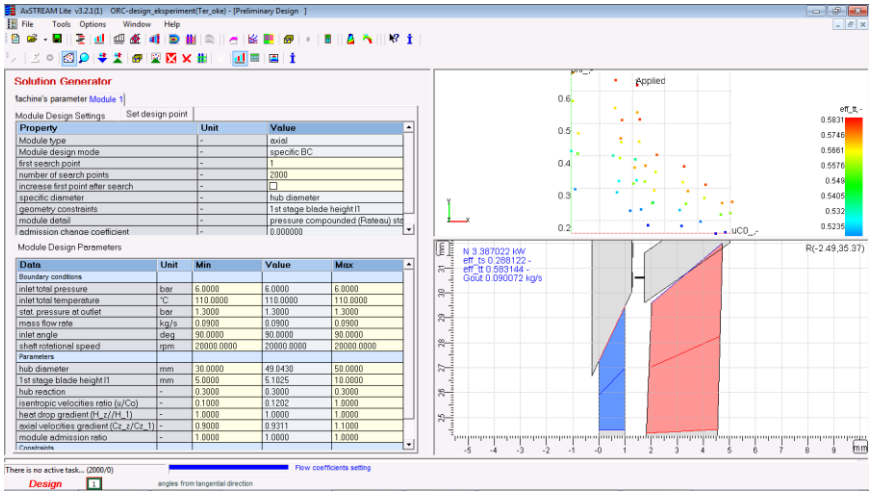
Simulasi *preliminary* desain dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak. Masukan *software* dan hasil simulasi untuk efisiensi turbin dan daya turbin adalah seperti di bawah. Diperlihatkan bahwa daya keluaran turbin adalah 3,4 kW dan efisiensi 0.58 dengan daya keluaran agak sedikit berbeda dari nilai simulasi ORC sebelumnya. Hal tersebut disebabkan pada simulasi preliminary desain dengan nilai masukan laju fluida kerja dibawah 0,09 kg/s hasilnya kurang memuaskan. Data masukan simulasi selengkapnya berada pada sebelah kiri. Diperlihatkan diameter *hub* yang cocok setelah disimulasi adalah 49 mm, tinggi *blade* adalah 5.1 mm. Dari hasil simulasi Gambar 3 sebelah kanan, terlihat bahwa tebal dari *inlet* ke *outlet* untuk *blade* stator sekitar 1 mm dan tebal *blade* rotor adalah sekitar 3,5 mm.

Kemudian dari hasil simulasi *software* yang sama juga didapatkan data untuk perancangan rotor dan stator turbin adalah seperti Tabel 1 di bawah. Menggunakan tabel tersebut, diketahui bahwa diameter stator terbesar adalah senilai 59 mm dengan diameter rotor terbesar adalah 64 mm. Geometrik dari *blade* stator dan rotor masing-masing terdiri dari 3 section. Yakni pada bagian *inlet blade*, yakni jari-jarinya *section* pertama adalah 24,52 mm, bagian tengah 25,89 mm dan bagian atas 27,26 mm dari pusat poros. Untuk bagian *outlet* dari *blade* stator section pertama adalah 24,52 mm, tengah 26,99 mm, dan atas adalah 29,46 mm dari pusat poros.

Adapun bagian *blade* rotor pada bagian yang berhadapan dengan *outlet* dari *blade* stator mempunyai jari-jari pada *section* pertama adalah sepanjang 24,37 mm, tengah adalah 26,99 mm, dan bagian atasnya adalah 29,61 mm. Untuk bagian ujung luar masing-masing *section*-nya adalah 24,52 mm, 28,26 mm, dan *section* teratas adalah 32 mm.

Kemudian dari tabel yang sama diketahui bahwa jumlah *blade* stator dan rotor pada tahapan *preliminary* ini adalah 40 buah, dan jumlah *blade* rotor sebanyak 92 buah. Sebagai catatan bahwa jumlah *blade* akan perlu disesuaikan lagi pada tahap detail desain nanti-nya, yakni karena pada tahap *prelimanry* tersebut belum melibatkan dimensi dan bentuk *blade* secara detail.

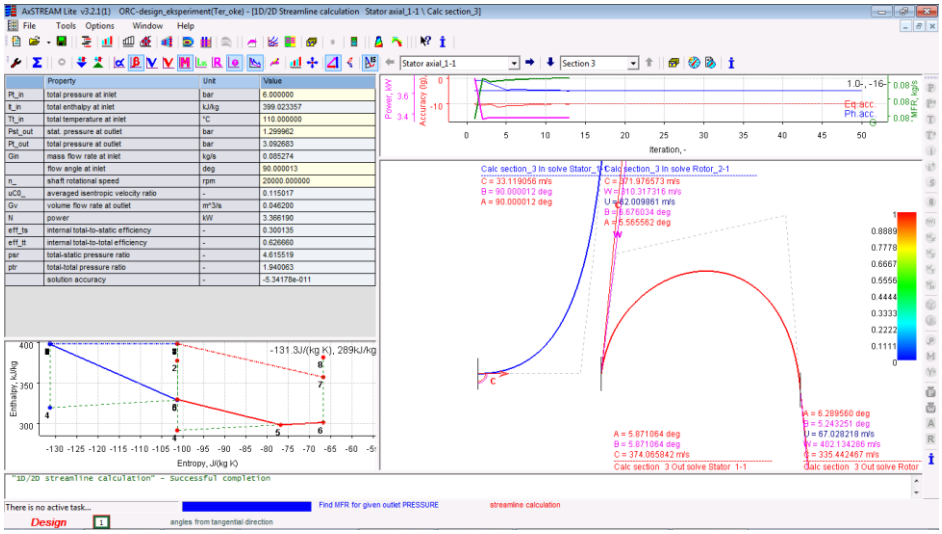
Pada Gambar 4 dari hasil optimasi simulasi, untuk gambaran segitiga kecepatan, diketahui bahwa bentuk dasar dari permukaan *blade* stator dan *blade* rotor adalah melengkung. Bentuk *blade* stator tersebut adalah bentuk permukaan yang dipapar langsung terhadap aliran fluida kerja. *Flow* absolut sebelum masuk *blade* stator adalah 33 m/s. Dengan bentuk *blade* stator seperti tergambar, dapat dibayangkan seperti corong venturi yang berbelok, akan mendapatkan *flow* mutlak *outlet* keluar dari stator menjadi 374 m/s. Pada *inlet* rotor akan didapatkan *flow* mutlak sekitar 371 m/s turun sedikit dari *outlet* stator, kecepatan sudut tangensial rotor adalah sekitar 62 m/s dan dengan kecepatan relatifnya adalah 310 m/s. Pada Gambar 4 tersebut juga diperlihatkan *entalphy static* dari *inlet* rotor turbin sekitar 330 kJ/kg dan enthalpy setelah meninggalkan rotor adalah sekitar 290 kJ/kg.



Gambar 3: Masukan data dan hasil pengolahan data simulator untuk turbin ORC stage-1 supersonic

Tabel 1: Hasil simulasi software untuk preliminary desain dari turbin axial 1 stage daya mekanik 3,4 kW

	Compound_N	FComp_D1t	FComp_D1m	FComp_D1h	FComp_lc2	FComp_D2t	Blade_z	Blade_D_l	SectA_ri1	SectA_ri2	SectA_ax1	SectA_ax2
	kW	mm	mm	mm	mm	mm	-	-	mm	mm	mm	mm
Stage_1	3,4											
Stator axial_1-1		54,52	51,78	49,04	4,94	58,92						
Blade Stator axial_1-1							40	10,93				
Geom section_1 blade Stator_1-1									24,52	24,52	0,00	1,00
Geom section_2 blade Stator_1-1									25,89	26,99	0,00	1,00
Geom section_3 blade Stator_1-1									27,26	29,46	0,00	1,00
Rotor axial_2-1		59,22	53,98	48,74	7,48	64,01						
Blade Rotor axial_2-1							92	7,55				
Geom section_1 blade Rotor_2-1									24,37	24,52	0,00	2,73
Geom section_2 blade Rotor_2-1									26,99	28,26	0,10	2,82
Geom section_3 blade Rotor_2-1									29,61	32,00	0,21	2,92



Gambar 4: Masukan data dan hasil pengolahan data simulator untuk turbin ORC stage-1

Dengan didapatkannya hasil kajian *prelimary* tersebut, maka dapat diharapkan gambaran detail dari bentuk rotor dan stator penyusun turbin menjadi semakin jelas. Bentuk-bentuk *blade* tersebut jika didetailkan sebaiknya tetap mengikuti bentuk permukaan pada tahap *preliminary* desain. Misal untuk meminimalkan ruang antar *blade* dapat dibuat bentuknya menyerupai bentuk perahu kano yang dibengkokkan sesuai dengan permukaan yang telah didapatkan pada tahapan ini. Penurunan sedikit dari efisiensi akibat pendemensian *blade* kemungkinan akan ditemukan pada tahap detail desain.

Terlihat dari hasil simulasi optimasi bahwa untuk mendapatkan daya sekitar 3,5 kW kebutuhan laju fluida kerja adalah sekitar 0,085 kg/s. Gambaran desain *preliminary* tersebut memperlihatkan bahwa turbin gas *axial* skala kecil untuk kebutuhan demontrasi siklus Rankine organik ternyata memungkinkan untuk dibuat detail desainnya.

5. KESIMPULAN

Dalam mendapatkan gambaran mula-mula dari desain turbin *ORC*, dapat dilakukan dengan melalui dua tahapan penting yakni pertama adalah melakukan tahapan konsep desain dari *ORC*. Pada tahapan konsep desain ini akan didapat parameter penting seperti *flow inlet*, tekanan *inlet-outlet*, dan temperatur *inlet* dari turbin.

Selanjutnya dari konsep desain akan dapat diteruskan menjadi *preliminary* desain untuk turbin sehingga didapatkan data perkiraan untuk diameter hub dan juga panjang dan lebar *blade* maupun nosel dan juga akan

didapatkan gambaran bentuk permukaan *blade* stator maupun *blade* rotor.

Dari konsep desain dan hasil simulasi *preliminary* desain dapat diperlihatkan bahwa turbin dengan ukuran relatif kecil yakni sekitar 3.5 kW akan dapat didetailkan. Dapat diketahui bahwa kebutuhan laju fluida kerja dengan tekanan dan temperatur masukan sekitar 6 bar, 110 ^{0}C adalah sebesar 0,085 kg/s dengan fluida kerja gas n-pentane.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Naoko Yamaguchi '*Design of Wayang Windu Unit 2 Geothermal Power Station*" Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.

[2] Mulyadi & Ali Saat, *Reservoir Modeling of The Northern Vapor Dominated Two-phase Zone of The Wayang Windu Geothermal Field, Java, Indonesia, Proceedings*, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 31 - February 2, 2011

[3] Leonid Moroz, dkk, *A Univorm Approach to Conceptual Design of Axial Turbin/Compressor Flow Path, The Future of Gas Turbine Technology*, 3rd International Conference, Brussels, 11-12 October 2006

[4] Head of Geological Agency, *Indonesian Geothermal Resource*, 2009

[5] Angad Singh Panesar, *A study of organic Rankine cycle systems with the expansion process performed by twin screw machines*, City University London School of Engineering and Mathematical Sciences, 2012.

[6] Ignatius Riyadi Mardiyanto, dkk, 2012, "*Konsep Desain Pembangkit Listrik Tenaga Uap Memanfaatkan Sumber Panas Bertemperatur Rendah dengan Memakai Siklus Rankine Organik*, Jurnal Teknik Energi Vol 2 No 1.